

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Paleka

Zagreb, 2009.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor

prof. dr. sc. Mladen Stupnišek

Marko Paleka

Zagreb, 2009.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Paleka**

Mat. br.:0035140815

Naslov: **UPRAVLJANJE PROCESIMA TOPLINSKE OBRADJE METALA**

Opis zadatka:

Kvaliteta toplinske obrade metalnih proizvoda ovisi o primjerenom određivanju tehnoloških parametara ali i o pouzdanoj provedbi u odgovarajućoj opremi. Poboljšanje kvalitete postojećih metalnih materijala i razvoj novih sve više postavlja zahtjeve na pouzdano upravljanje procesima toplinske obrade a napose kod kaljenja alata. Uvode se dodatna osjetila za temperaturu na površini i u jezgri ispitnog čeličnog dijela radi praćenja tijeka ugrijavanja i tijeka ohlađivanja po cijelom presjeku. Radi toga se razvijaju programski regulatori i programi za upravljanje cjelovitim procesima.

U uvodnom dijelu ovog rada potrebno je opisati osnovne principe određivanja tehnoloških parametara toplinskih obrada s posebnim osvrtom na kaljenje alata. Opisati principe mjerenja i reguliranja temperature pri toplinskim obradama. Iz dostupnih izvora opisati stanje ponude opreme koja je namijenjena za upravljanje procesima toplinske obrade posebice primjerene za provedbe tehnoloških parametara kaljenja alata.

U praktičnom dijelu rada potrebno je za dostupnu programsku opremu izraditi program upravljanja procesom kaljenja alata prema tehnološkim parametrima u specifikaciji GM Powertrain DC 9999-1.

Potrebno je također izraditi program pohrane podataka procesa te grafički prikaz provedenog procesa kaljenja.

Navesti korištenu literaturu i primljenu stručnu pomoć.

Zadatak zadan:

16. travnja 2009.

Rok predaje rada:

18. lipnja 2009.

Predviđeni datum obrane:

01. – 03. srpnja 2009.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Mladen Stupnišek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

IZJAVA

Ovaj diplomski rad izradio sam samostalno, uz nadzor i stručne savjete mentora prof.dr.sc. Mladena Stupniška, koristeći se navedenom literaturom te znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

ZAHVALA

Zahvalio bih svojim roditeljima i svojoj djevojci na velikoj potpori koju su mi davali tijekom moga studiranja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, a osobito sad kod izrade ovog diplomskog rada.

Jednako se tako zahvaljujem svome mentoru prof. dr. sc. Mladenu Stupnišku koji mi je pristao biti mentorom i koji mi je tijekom izradbe ovog diplomskog rada svojim dobrim savjetima omogućio da ovaj rad završim na što bolji način.

Upućujem zahvalu i svojim prijateljima sa studija, koji su mi također davali značajnu potporu u želji da završim studij.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORETSKI DIO	2
2.1. Općenito o toplinskoj obradbi	2
2.2. Toplinska obrada alatnih čelika za topli rad	6
2.2.1. Toplinska obradba niskolegiranih Ni-Mo-Cr-V čelika	10
2.2.1.1. Žarenje za redukciju napetosti	13
2.2.1.2. Kaljenje	14
2.2.1.3. Popuštanje	15
2.2.2. Toplinska obradba visoko legiranih čelika Cr-Mo-V	15
2.2.2.1. Žarenje	19
2.2.2.2. Prokaljivost i postupci kaljenja	20
2.2.2.3. Kaljenje	20
2.2.2.4. Popuštanje	22
2.2.3. Visoko legirani W-Cr-V čelici za kalupe za tlačno lijevanje	22
2.2.3.1. Žarenje	25
2.2.3.2. Kaljenje	25
2.2.3.3. Popuštanje	26
2.3. Određivanje parametara toplinske obradbe	28
2.3.1. Austenitizacija	28
2.3.1.1. Određivanje temperature austenitizacije	29
2.3.1.2. Režim ugrijavanja na temperaturu austenitizacije	29
2.3.1.3. Određivanje vremena austenitizacije (grijanja)	30
2.3.1.3.1. Određivanje vremena grijanja (tgr) metodom Ordinanz	31
2.3.1.3.2. Određivanje vremena grijanja metodom Newton	32
2.3.2. Određivanje zaštitne atmosfere	34
2.3.3. Gašenje i sredstva za gašenje	36
2.3.4. Popuštanje	39
2.4. Upravljanje procesom toplinske obradbe	41
2.4.1. Osjetilo za mjerenje temperature (termopar)	45
2.4.2. Uređaji za regulaciju	47

2.4.2.1. PID regulator i iz njega izvedeni regulatori	48
2.4.2.2. PD regulator	50
3. PRAKTIČNI DIO	51
3.1. Postupci kaljenja alata	51
3.2. Preporuke tvrtke <i>GENERAL MOTORS</i>	52
3.2.1. Oprema	52
3.2.2. Toplinska obradba prema GM PT 9999-1	53
3.2.3. Žarenje za redukciju napetosti	54
3.2.4. Austenitizacija	55
3.2.5. Gašenje	55
3.2.6. Popuštanje	56
3.3. Preporuke tvrtke <i>FORD</i>	57
3.3.1. Vakuumska peć ili gašenje u fluidu	57
3.3.2. Lokacije rupa za umetanje termoparova	57
3.3.3. Žarenje za redukciju napetosti	58
3.3.4. Austenitizacija	58
3.3.5. Gašenje	59
3.3.6. Popuštanje	60
3.4. Preporuke tvrtke <i>BÖHLER</i>	61
3.4.1. Žarenje	63
3.4.2. Žarenje za redukciju napetosti	63
3.4.3. Kaljenje	63
3.4.4. Popuštanje	64
3.5. Preporuke tvrtke <i>BODYCOTE</i>	65
3.6. Usporedbe gašenja u ulju i inertnom plinu	68
3.7. Programski kontroler tvrtke <i>Shimaden</i> serije FP93	72
3.8. Simulacija procesa kaljenja u programu <i>Matlab</i>	75
4. ZAKLJUČAK	79
5. LITERATURA	80
6. PRILOG	81
6.1. Programski kod simulacije procesa kaljenja u <i>Matlab-u</i>	81

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Dijagram postupka [2]	3
Slika 2.2. Koeficijent toplinske vodljivosti nekih tehničkih legura ovisno o temperaturi [2]	8
Slika 1.3. Utjecaj legirajućih elemenata na TTT dijagram [1]	9
Slika 2.4. Dijagram popuštanja čelika 56 NiCrMoV 6 [3]	11
Slika 2.5. Dijagram popuštanja čelika 56 NiCrMoV 7 [3]	11
Slika 2.6. Tijek toplinske obradbe niskolegiranih alata za ukovnje [3]	12
Slika 2.7. TTT dijagram čelika 56 NiCrV 7 [3]	12
Slika 2.8. TTT dijagram čelika 55 NiCrMoV 6 [3]	13
Slika 2.9. Tijek faza toplinske obradbe niskolegiranog alatnog čelika [3]	14
Slika 2.10. Blok dijagram tijeka toplinske obradbe čelika X38 CrMoV 5 1 [3]	16
Slika 2.11. TTT dijagram čelika X38 CrMoV 5 1 [3]	17
Slika 2.12. Blok dijagram tijeka toplinske obradbe čelika X40 CrMoV 5 1 [3]	17
Slika 2.13. TTT dijagram čelika X40 CrMoV 5 1 [3]	18
Slika 2.14. Dijagram popuštanja čelika X38 CrMoV 5 1 [3]	19
Slika 2.15. Dijagram popuštanja čelika X40 CrMoV 5 1 [3]	19
Slika 2.16. Shematski prikaz faza toplinske obradbe alatnih čelika Cr-Mo-V [3]	21
Slika 2.17. Blok dijagram tijeka toplinske obradbe čelika X30 WMoV 9 3 [3]	23
Slika 2.18. TTT dijagram čelika X30 WCrV 9 3 [3]	23
Slika 2.19. Dijagram popuštanja čelika X30 WCrV 9 3 [3]	24
Slika 2.20. Shematski prikaz faza toplinske obradbe W-Cr-V visokolegiranih alatnih čelika [3]	26
Slika 2.21. Utjecaj visine temperature austenitizacije na tvrdoću kaljenog i popuštenog stanja [3]	27
Slika 2.22. Vrijeme grijanja u zavisnosti od "s·K" [7]	31
Slika 2.23. Karakteristična dimenzija "s" i koeficent "K" za neke obratke [7]	32
Slika 2.24. Određivanje gornje kritične brzine gašenja vkg iz TTT dijagrama [7]	37
Slika 2.25. "Idealizirana" krivulja gašenja u TTT dijagramu [2]	37
Slika 2.26. Odziv sustava na pobudu kod toplinskog procesa [9]	42

Slika 2.27. Električne peć za toplinsku obradbu [15]	43
Slika 2.28. Odziv toplinskog procesa na skokovitu pobudu [9]	43
Slika 2.29. Pojednostavljena shema termopara [10]	45
Slika 2.30. Odnos temperature i izlaznog napona iz termopara [10]	46
Slika 2.31. Shematski prikaz regulacijskog kruga sa povratnom vezom [9]	47
Slika 2.32. Paralelna struktura PID regulatora [11]	48
Slika 3.1. Lokacije za umetanje termoparova na testni blok dimenzija (16"x16"x16) [12]	54
Slika 3.2. TTT dijagram alatnog čelika za topli rad W302 Superior [14]	62
Slika 3.3. Tvrdća popuštanja u odnosu na temperaturu popuštanja [14]	64
Slika 3.4. Preporuke tvrtke <i>Bodycote</i> za posebnu kvalitetu toplinske obradbe alatnog čelika za topli rad H13 premium [15]	65
Slika 3.5. Princip grijanja na temperaturu austenitizacije te držanje na toj temperaturi čelika H13 prema preporukama tvrtke <i>Bodycote</i> [15]	66
Slika 3.6. Utjecaj režima gašenja na pojavu površinskih pukotina pri eksploataciji alata [15]	67
Slika 3.7. Usporedba krivulja ohlađivanja kod kaljenja dušikom pod tlakom i u ulju s rezultatima postignutih tvrdća [16]	68
Slika 3.8. Omekšanje površinskog sloja alata za topli rad u eksploataciji, ovisno o brzini gašenja [17]	69
Slika 3.9. Vakuumska peć <i>Schmetz</i> , system 2 plus za povećanje intenzivnosti gašenja s odvojenim intenzivnim ohlađivanjem plinom [18]	70
Slika 3.10. Vakuumska peć BMI P16_TH, za povećanje intenzivnosti gašenja s odvojenim intenzivnim ohlađivanjem u ulju[19]	71
Slika 3.11. Shema zaslona programskog kontrolera FP93 [20]	72
Slika 3.12. Grafički prikaz zona PID regulatora [20]	73
Slika 3.13. Način spajanja programskog kontrolera FP93 sa dva kontrolera SR83 u svrhu praćenja temperature sa tri termopara [20]	74
Slika 3.14. Shematski tijek procesa kaljenja sa zadanim parametrima	75
Slika 3.15. Primjer peći za kaljenje alata za topli rad [21]	77
Slika 3.16. Shema upravljanja procesom kaljenja sa dva ugrađenja termopara preko povratne veze	77
Slika 3.17. Odziv procesa na programski upravljanu referentnu(vodeću) veličinu	78

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Oznake i sastav najvažnijih Ni-Mo-Cr-V čelika [3]	10
Tablica 2.2. Oznake i sastav najvažnijih Cr-Mo-V čelika [3]	15
Tablica 2.3. Utjecaj načina gašenja na tvrdoću kaljenog i popuštenog stanja [3]	21
Tablica 2.4. Oznake i sastav najvažnijih W-Cr-V čelika [3]	22
Tablica 2.5. Izlučivanje karbida ovisno o temperaturi popuštanja [3]	27
Tablica 2.6. Nadomjesno mrtvo vrijeme i nadomjesna vremenska konstanta [9]	44
Tablica 2.7. Usporedba standardnih termoparova [10]	45
Tablica 2.8. Utjecaj parametara regulatora na proces [11]	49
Tablica 3.1. Sastav H13 premijum čelika prema GM PT 9999-1[12]	52
Tablica 3.2. Sastav čelika W302 superior [14]	61
Tablica 3.3. Utjecaj brzine gašenja na postignutu tvrdoću [14]	62
Tablica 3.4. Postignuta tvrdoća nakon gašenja sa temperature austenitizacije [14]	63

POPIS OZNAKA

A	austenit
A ₁	točka pretvorbe [°C]
A ₃	točka pretvorbe [°C]
B	bajnit
Bi	biotova zvačajka
c	specifični toplinski kapacitet [J/kgK]
E	modul elastičnosti [N/mm ²]
e(t)	regulacijsko odstupanje
K _d	prijenosni omjer D-sustava
K _i	prijenosni omjer I-sustava
K _p	prijenosni omjer P-sustava
K _r	pojačanje regulatora
M	martenzit
M _s	temperatura početka stvaranja martenzita pri gašenju [°C]
P	perlit
R _m	vlačna čvrstoća [N/mm ²]
s	karakteristična dimenzija [mm]
T _a	temperatura austenitizacije [K]
T _{pov}	temperatura površine [K]
T _{jez}	temperatura jezgre [K]
ΔT	temperaturna razlika [K, (°C)]
T _d	derivacijsko vrijeme
T _i	integralno vrijeme
t _i	trajanje (vrijeme) inkubacije [s, min, h]
t _{gr}	trajanje (vrijeme) ugrijavanja [s, min, h]
t _{hl}	trajanje (vrijeme) hlađenja [s, min, h]
U	napon na izlazu iz termopara [μV]
u(t)	upravljačka veličina
v _{hl}	brzina hlađenja [K/min, (°C/min)]
v _{kg}	gornja kritična brzina gašenja [K/min, (°C/min)]
x _R (t)	referentna (vodeća) veličina
y(t)	izlazna (regulirana) veličina

Grčka slova

α	koeficijent konvekcijskog prijelaza topline [W/m ² K]
α	koeficijent toplinskog rastezanja [K ⁻¹]
α	Seebeckov koeficijent [μ V/K]
ε	koeficijent usporenja ugrijavanja
\mathcal{G}_{pov}	temperatura površine [°C]
\mathcal{G}_{jez}	temperatura jezgre [°C]
\mathcal{G}_{a}	temperatura austenitizacije [°C]
$\mathcal{G}_{\text{peč}}$	temperatura peći [°C]
\mathcal{G}_{p}	temperatura popuštanja [°C]
\mathcal{G}_{i}	temperatura inkubacije [°C]
λ	koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]
ρ	gustoća [kg/m ³]
σ_{topl}	toplinsko naprezanje [N/mm ²]
τ	nadomjesna vremenska konstanta
τ_{m}	nadomjesno mrtvo vrijeme

Kratice

HB	tvrdoća po Brinellu
HV	tvrdoća po Vickersu
HRC	tvrdoća po Rokwellu C
TTT	Time Temperature Transformation

SAŽETAK

Diplomski rad sastoji se od teorijskog i praktičnog djela. Teorijski dio sastoji se od opisa alatnih čelika za topli rad, načina određivanja parametara toplinske obradbe te automatizacije procesa toplinske obradbe.

Opis alatnih čelika za topli rad sadrži zahtjeve i karakteristike alata za topli rad, te principe toplinske obradbe sa zadanim parametrima.

U poglavlju 2.3 opisane su metode određivanja parametara toplinske obradbe alata ovisno o namjeni, kemijskom sastavu, veličini i obliku alata te sredstvu za gašenje.

U poglavlju 2.4 opisani su principi upravljanja i regulacije procesa, vrste regulatora te način namještanja parametara regulatora. Također su opisana i osjetila za mjerenje temperature (termoparovi).

U praktičnom dijelu opisane su osnovne značajke dostupnih preporuka i specifikacija poznatih svjetskih tvrtki za toplinsku obradbu tipiziranog alatnog čelika za topli rad, te usporedbe utjecaja medija i režima gašenja na tvrdoću alata nakon kaljenja i nakon određenog vremena eksploatacije. Također je opisan programski kontroler tvrtke Shimaden, za upravljanje procesom toplinske obradbe.

U zadnjem djelu rada temeljem preporuka tvrtke *Bodycote* prikazan je simulacijski model procesa kaljenja alata za topli rad u programu *Matlab*.

1. UVOD

Današnje vrijeme globalizacije donijelo je i veliku konkurenciju na tržištu. Opstanak na tržištu zahtijeva neprestano poboljšanje kvalitete uz istodobno smanjenje troškova. To se postiže velikoserijskom proizvodnjom uz golemu pouzdanost strojeva i alata. Samim time se postavljaju visoki zahtjevi glede kvalitete alata od kojeg se očekuje maksimalna trajnost uz minimalno održavanje.

U proizvodnji alata, osim pravilnog izbora materijala, važnu ulogu ima toplinska obradba. Poznavajući zahtjeve u eksploataciji, ali i druge zahtjeve - kao što su dimenzije, tolerancije i kompleksnost alata te karakteristike sirovog materijala - mora se definirati kojim će se toplinskim obradbama postići odgovarajuća mikrostruktura, a time i tražena svojstva.

Osnovni principi toplinske obradbe alatnih čelika ne razlikuju se uvelike od onih za konstrukcijske čelike, ali zahtijeva postupnije predgrijavanje radi slabije toplinske vodljivosti te sama realizacija zahtijeva nešto drugačiju i precizniju tehniku. Radi toga je potrebna automatizirana oprema, koja omogućava precizno praćenje i vođenje temperature putem računala, te drugih uređaja razvijenih u svrhu vođenja tehnoloških procesa.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Općenito o toplinskoj obradbi

Čisti metali imaju relativno nisku mehaničku otpornost (npr. čvrstoću) pa se zato rijetko rabe u mehaničkim konstrukcijama. Zbog toga se primjenjuju metalni materijali u obliku legura (slitina) koje, zahvaljujući promjenama mikrostrukture, postižu znatno viša mehanička svojstva. Znatnije povećanje čvrstoće postiže se postupcima toplinske obradbe kojima se bitno mijenja mikrostruktura materijala. Pri tome nastaju i novi mikrostrukturalni oblici različiti od onih u pripadnim ravnotežnim stanjima.

Temeljni parametri postupka toplinske obradbe su :

- temperatura,
- trajanje (vrijeme).

Iz ovih osnovnih parametara toplinske obradbe izvodi se parametar:

$$\frac{dT}{dt} = v (^\circ \text{C/s}, ^\circ \text{C/min}, ^\circ \text{C/h})$$

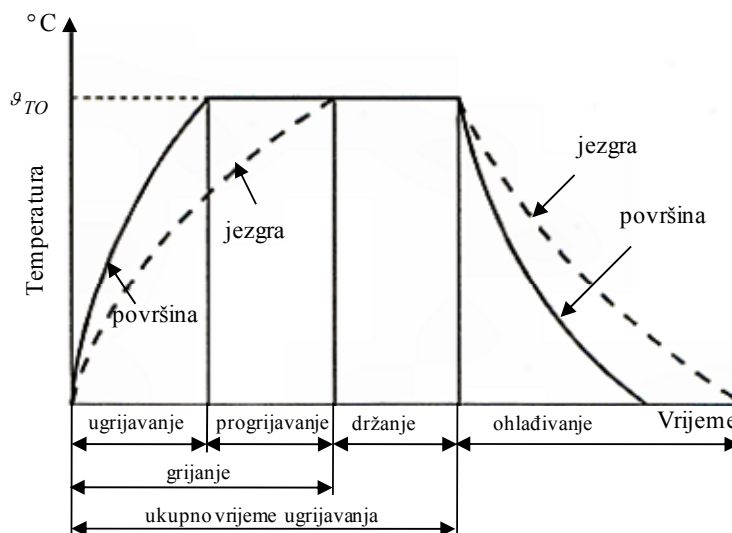
koji se naziva brzinom (ohlađivanja odnosno grijanja). Uz $t_{hl} \rightarrow \infty$ (tj. uz uvjet $v_{hl} \rightarrow \phi$) u Fe-C legurama omogućuje se u potpunosti difuzija atoma željeza i ugljika. Ako se trajanje ohlađivanja t_{hl} skraćuje sve više tj. ako se povisuje brzina ohlađivanja v_{hl} , difuzija je sve nepotpunija, pa čak i u potpunosti izostaje ako v_{hl} prekorači neku graničnu vrijednost. Fizikalni proces difuzije između ostalog ovisi i o temperaturi i trajanju. [1]

Toplinska obradba metala obuhvaća cijeli niz postupaka zagrijavanja i hlađenja koji se primjenjuju pri izradi različitih alata i drugih dijelova strojeva s ciljem dobivanja željenih mehaničkih svojstava dotičnog predmeta - obratka.

Tijekom tih postupaka legura se u krutom stanju izvrgava djelovanju niza temperaturno-vremenskih promjena sa svrhom promjena strukture, a time i promjene svojstva u željenom smislu. [2]

Procesi toplinske obradbe obuhvaćaju žarenje, kaljenje, popuštanje, poboljšavanje te površinska otvrdnjavanja .

Opći postupak svakog vida toplinske obrade može se opisati dijagramom ovisnosti promjene temperature o vremenu (trajanju). Taj dijagram $\vartheta = f(t)$, prikazan na slici 2.1, naziva se dijagram postupka.



Slika 2.1. Dijagram postupka [2]

Iz dijagrama na slici 2.1 vidi se da će se u općem slučaju u fazi ugrijavanja uspostaviti temperaturna razlika između površine predmeta i njegove unutrašnjosti tj. jezgre. Ta će razlika biti tim veća što je veća brzina ugrijavanja, što je veći volumen (masa) grijanog predmeta, što je niži koeficijent toplinske vodljivosti itd.

Isto se tako vidi da je proces ugrijavanja u vremenu moguće podijeliti u karakteristične odsječke:

- **ugrijavanje** je onaj odsječak vremena u kojem će površina grijanog predmeta (rub) dosegnuti zadanu temperaturu.
- **progrijavanje** je onaj odsječak vremena u kojem će unutrašnjost predmeta (jezgra) također dosegnuti zadanu temperaturu, odnosno u kojem će se uspostaviti barem

približno temperaturno stanje $\Delta T = T_{\text{pov}} - T_{\text{jez}} \approx 0$. Temperaturne razlike u tijeku ugrijavanja su važne, jer o njima neposredno ovise vlastita naprezanja (toplinske napetosti) poznate iz formule:

$$\sigma_{\text{topl}} = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Ovdje znače:

σ_{topl} , N/mm².....toplinsko naprezanje,

$E = f(\vartheta)$, N/mm² ..modul elastičnosti grijanog tijela,

α , mm/mmK, (odnosno K⁻¹)....koeficijent toplinskog rastezanja grijanog tijela,

ΔT , K (ili °C).....temperaturna razlika između ruba i jezgre,

- **držanje** je onaj odsječak vremena koji je potreban za željenu homogenizaciju strukture (npr. za otapanje željenog udjela karbida, nitrida, nečistoća itd.).
- **trajanje ohlađivanja** ovisi o izabranom sredstvu za hlađenje, a taj izbor ovisi o vrsti legure i o željenoj strukturnoj promjeni.

Svi ovi odsječci su jako važni za uspješno izvođenje cijelog postupka toplinske obradbe. Osnovna razlika u kinetici pretvorbe (transformacije) pri ugrijavanju prema kinetici pri ohlađivanju je u činjenici da se u prvom slučaju radi o pojavama uz povišenje intenzivnosti difuzije, dok se u drugom slučaju radi o sniženju njezine intenzivnosti čak i tako daleko, da će dovoljno visoke intenzivnosti ohlađivanja potpuno eliminirati odvijanje difuzije, tj. dovesti do bezdifuzijskih transformacija (tzv. preklopnih transformacija).[2]

Kaljenje je najrašireniji postupak toplinske obradbe metala. Sastoji se od odgovarajućeg gašenja s određene temperature austenitizacije da bi se postigla martenzitna struktura. Sposobnost ohlađivanja sredstva za gašenje uglavnom ovisi o toplinskim svojstvima metala, debljini oblika obradaka te o svojstvima odvođenja topline sredstva za gašenje.

Pravilnim izborom odgovarajućeg sredstva za gašenje smanjuje se opasnost od nastajanja napetosti, eventualnih pukotina i deformacija obratka.

Kaljenjem se naziva ugrijavanje čelika na dovoljno visoku temperaturu radi austenitizacije i otapanja dovoljne količine ugljika u austenitu, te naglog hlađenja, pri čemu se stvara vrlo tvrda, krhka i nestabilna martenzitna struktura. Kaljenjem se povećava tvrdoća i čvrstoća čelika.

Nakon postupka kaljenja provodi se postupak popuštanja na temperaturama između 20° i A_1 u svrhu povišenja žilavosti te smanjenja zaostalih naprezanja. U tekstu koji slijedi opisani su postupci toplinske obradbe alatnih čelika za topli rad.

2.2. Toplinska obrada alatnih čelika za topli rad [3]

Čelici za rad na povišenim temperaturama su alatni čelici koji se primjenjuju za oblikovanje metala bez skidanja strugotine na povišenim temperaturama i pri tome podnose trajnu temperaturu iznad 200°C. Ti se čelici primjenjuju uglavnom kao materijali za kokile tlačnog lijeva, ukovnje i alate za istisne preše u preradi metala.[4]

U alatima za topli rad (kokile, ukovnji, preše itd.) mogu nastupiti ova naprezanja:

- mehanička (statička ili dinamična),
- toplinska,
- trošenje pri povišenim temperaturama.

Dva su momenta posebno kritična u radu alata :

- početak rada (alat je hladan, ΔT naglo raste, napetosti visoke),
- cikličko mijenjanje temperature na radnoj plohi.

Ovo cikličko mijenjanje temperatura izaziva težnju površinskih slojeva prema rastezanju i stezanju. No kako hladnija jezgra ne dopušta dilataciju u površinskim slojevima se javljaju tlačna naprezanja. To bi čak i bilo povoljno, jer su alati za topli rad potpuno prokaljeni, pa im u površinskim slojevima vladaju vlačne napetosti. Međutim, treba računati da su tlačne napetosti toliko viske da čak izazivaju trajnu deformaciju sloja. Te cikličke promijene dovode do toplinskog umora površinskih slojeva. Kod kalupa za kovanje (ukovnja) trajanje dodira vrućeg sirovca je znatno kraće pa su i toplinska naprezanja manja. Dok je kod kalupa za lijevanje toplinsko naprezanje puno veće.

Da bi se proizveo kvalitetan alat, osim pravilnog izbora materijala, treba uzeti u obzir i njegovu toplinsku obradbu. Budući da se od alata traži maksimalna trajnost uz minimalno održavanje, potrebno je već u fazi konstruiranja obratiti pažnju na sljedeće:

- oblikovanje alata,
- izbor alatnog čelika,
- postupak toplinske obrade. [3]

Da bi ispunili zahtjeve koji se pred njih stavljaju, čelici za rad u toplom stanju moraju imati sljedeća svojstva:

- dobru postojanost prema popuštanju kako bi se spriječilo omekšanje na visokim radnim temperaturama,
- visoko naprezanje tečenja na povišenim temperaturama kako bi se spriječilo deformiranje pri radnoj temperaturi,
- visoku žilavost na povišenim temperaturama kako bi se izbjegli lomovi kod udarnog naprezanja,
- visok otpor prema trošenju na povišenim temperaturama kako bi se proizvelo po mogućnosti što više obradaka jednim alatom,
- postojanost prema koroziji i otapanju od strane tekućeg metala,
- postojanost prema izmjeničnim temperaturnim napreznjima,
- dimenzijsku postojanost prilikom toplinske obrade kako bi se uštedio dodatni rad u poboljšanom stanju,
- dobru sposobnost obrade skidanjem strugotine kako bi se alat ekonomično proizvodio,
- dodatak legirajućih elemenata podešen zadacima mehaničke obrade kako bi se troškovi materijala držali u granicama ekonomičnosti, posebno za velike alate. [4]

Niti jedan čelik nema sva ova potrebna svojstva. Stoga na izbor optimalnog utječu prvenstveno:

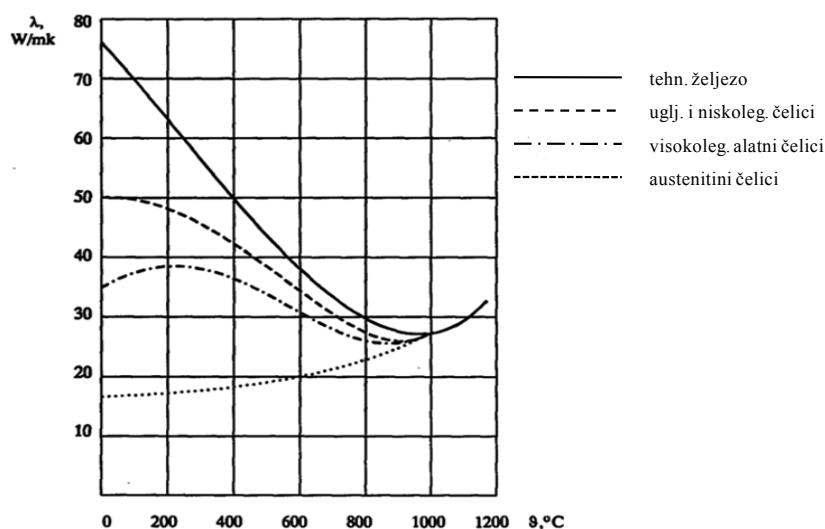
- temperatura alata u radu,
- način i visina opterećenja,
- način hlađenja alata.

Većinu spomenutih zahtjeva na alat u radu može se obuhvatiti jednim jedinim pojmom - **otpornošću na popuštanje**.

Otpornost na popuštanje obuhvaća:

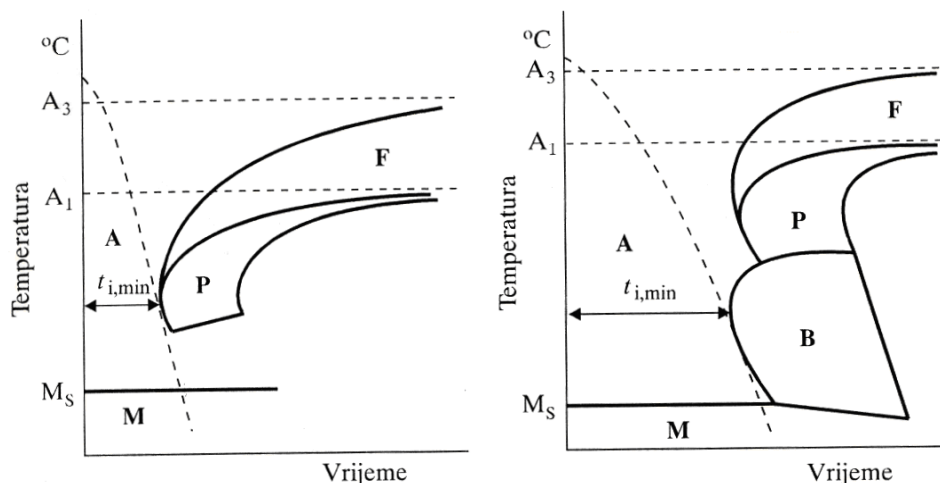
- otpornost prema strukturnim promjenama pri povišenoj tempera,
- visoku tvrdoću pri povišenoj temperaturi (odnosno malu sklonost omekšanju).

Da bi odgovorili navedenim zahtjevima, čelici od kojih se izrađuju alati za topli rad imaju visok sadržaj legirajućih elemenata. Iz tog razloga toplinska vodljivost ovih čelika je slaba. Stoga treba ugrijavati uz predgijavanja kako ne bi došlo do velikih temperaturnih razlika između toplije površine i hladnije jezgre, što bi moglo uzrokovati takva toplinska naprezanja koja izazivaju deformacije ili čak napuknuća alata (40 % svih kvarova uslijed toplinske obradbe nastaje upravo tijekom nepravilnog zagrijavanja i to u jezgri alata). Slika 2.2 prikazuje koeficijent toplinske vodljivosti nekih tehničkih legura u ovisnosti o temperaturi.



Slika 2.2. Koeficijent toplinske vodljivosti nekih tehničkih legura ovisno o temperaturi [2]

Za alatne čelike su važni oni legirajući elementi koji se otapaju pretežno u austenitu za vrijeme austenitizacije. Oni naime u velikoj mjeri ostaju otopljeni i u martnezitu i utječu na njegova svojstva kao i na opću prokaljivost čelika. Prokaljenost nekog predmeta ovisi o prokaljivosti čelika, dimenzijama predmeta i intenzivnosti gašenja. Prokaljivost je svojstvo čelika da nakon kaljenja poprimi što jednoličniju tvrdoću po presjeku predmeta. Prokaljivost ovisi o kemijskom sastavu čelika i veličini austenitnog zrna. Supstitucija legirajućih elemenata u austenit uzrokuje sniženje brzine transformacije u perlit odnosno bajnit, tj. povećava se trajanje inkubacije. Krivulje dijagrama TTT se stoga pomiču u desno tj. snižava se gornja kritična brzina (slika 2.3).



Slika 2.3. Utjecaj legirajućih elemenata na TTT dijagram [1]

Pri povišenim temperaturama svi čelici imaju niže R_m , R_e i HV (ovisno o vrsti i stupnju legiranosti) nego pri 20°C , dok im je žilavost pri povišenim temperaturama u pravilu viša.

Otpornost na popuštanje u širem smislu se kod ovih čelika postiže:

- legiranjem karbidotvorcima (W, Mo, V, Cr) koji popuštanjem stvaraju karbide popuštanja te s jedne strane povisuju otpornost na trošenje, a ujedno povisuju i otpornost na popuštanje. Volfram jako povisuje čvrstoću u toplom stanju, dok Mo, Cr i Ni povisuju prokaljivost čelika.
- legiranjem γ -genim elementima (Ni, Co). Nikl povisuje žilavost i prokaljivost. Cobalt općenito usporava reakcije, pa tako npr. omogućuje povišenje \mathcal{Q}_a (otapanje veće količine karbida), a da pri tome ne izaziva zaostajanje austenita. Pri popuštanju Co usporuje difuziju C iz martenzitne rešetke, tj. odgađa pad tvrdoće pri višim temperaturama te na taj način povisuje otpornost na popuštanje.

Dodatak Si pozitivno utječe na dinamičku izdržljivost, a potpomaže i djelovanje Cr u pogledu sniženja oksidacije pri povišenim temperaturama austenitizacije. Pri tome je dopušten nizak % C jer ovi alati ne režu, a postiže se dobra žilavost i dobra otpornost prema toplinskom umoru.

U načelu treba birati što niže legirani čelik koji odgovara zahtjevima u radu. Najčešće zastupljeni i najekonomičniji čelici s 5% Cr i dodatkom molibdena.

Nužno je pri austenitizaciji otopiti što više karbida kako bi W, Mo i Cr ušli u austenit, ali treba paziti da austenitno zрно ne naraste jer bi žilavost u radu bila niska. Zato je pravilo da se udarno opterećene alate treba kaliti sa donje granice \mathcal{Q}_a , a toplinski opterećene sa gornje granice \mathcal{Q}_a .

Zbog potrebne visoke žilavosti ovi se alati popuštaju nekoliko puta, kako bi se reducirao zaostali austenit, izlučili karbidi popuštanja i izlučio sekundarni matnezit. U tekstu koji slijedi pokazani su primjeri toplinske obradbe nekih od čelika za topli rad. [3]

2.2.1. Toplinska obradba niskolegiranih Ni-Mo-Cr-V čelika

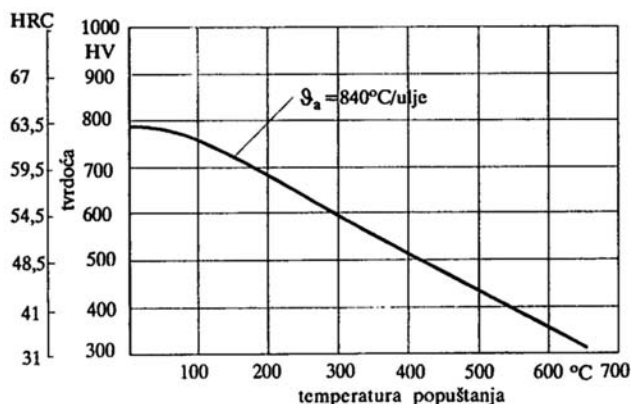
Tablica 2.1 prikazuje grupu čelika Ni-Mo-Cr-V, koju sačinjavaju dva čelika: 56 NiCrMoV 6 (Č5741) i 56 NiCrMoV 7 (Č5742). Kao što se vidi iz sastava, radi se o niskolegiranim alatnim čelicima namijenjenim za kovačke alate koji rade pri udarnim opterećenjima, a u površinskom sloju se zagrijevaju na temperaturu 500...550°C, što je znatno niže u odnosu na alate za prešanje i izvlačenje.

Tablica 2.1 Oznake i sastav najvažnijih Ni-Mo-Cr-V čelika [3]

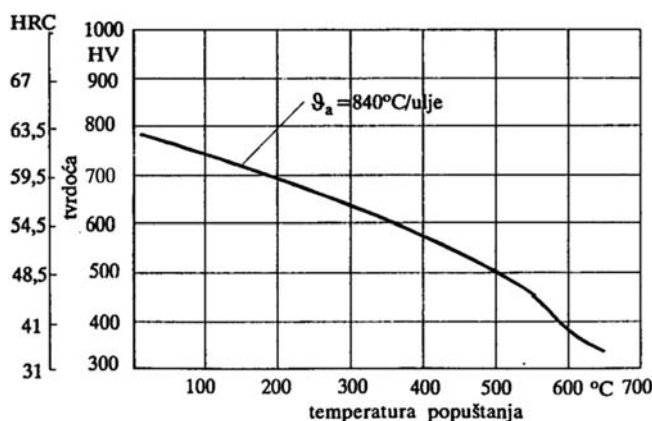
oznaka čelika				sastav, %					
VDEh	HRN	WNr. DIN 17007	AISI	C	Cr	Ni	Mo	V	W
56 NiCrMoV 7	Č5742	1.2714	~L6	0.55	1	1.7	0.5	0.1	
56 NiCrMoV 6	Č5741	1.2713	~L6	0.55	0.7	1.7	0.3	0.1	

Osnovni zahtjevi od ove grupe čelika, s obzirom da kovački alati imaju velike dimenzije i složene radne površine (gravura), su visoka udarna žilavost i vrlo dobra prokaljivost uz umjerenu toplinsku postojanost. Ostvarivanje ovih zadataka postiže se legiranjem niklom, kromom i molibdenom uz dodatak vanadija. Sadržaj ugljika u ovoj grupi čelika je 0,55%. Prokaljivost ove grupe čelika omogućuje dobivanje odgovarajuće ravnomjerne tvrdoće do dimenzija 400 x 300 x 300 mm. Razlika u tvrdoći površinskog sloja i jezgre je vrlo mala i iznosi svega 10 - 20 HB.

Pored odlične prokaljivosti i udarne žilavosti ova grupa čelika ima dobru postojanost prema popuštanju (slika 2.4 i 2.5) i protiv temperaturnih promjena, kao i dobru dimenzijsku postojanost.[5]



Slika 2.4. Dijagram popuštanja čelika 56 NiCrMoV 6 [3]

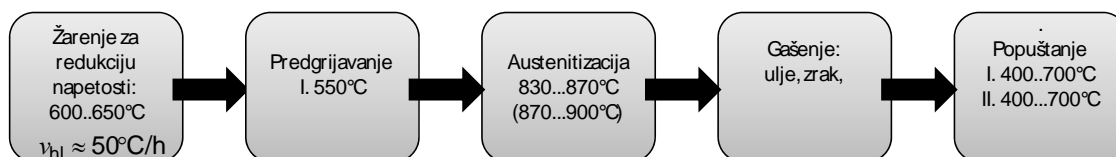


Slika 2.5. Dijagram popuštanja čelika 56 NiCrMoV 7 [3]

Kod ovih čelika najznačajniji legirajući element je Ni koji utječe na transformacijske procese. On pomiče perlitnu pretvorbu prema nižim temperaturama a bajnitnu prema višim. Kasniji početak perlitne pretvorbe omogućuje visoku prokaljivost kao što se vidi na TTT dijagramima (slika 2.7 i slika 2.8). Zajedno sa kromom i molibdenom, nikl u ovim čelicima pomiče i početak pretvorbe u bajnit prema duljim vremenima. Također nikl pomiče nastajanje sitnozrnate strukture nakon kaljenja te tako omogućuje visoku žilavost što je osobito važno kod ukovnja, koji su u radu izloženi jakim udarcima. Ovi čelici ne smiju biti skloni krhkosti

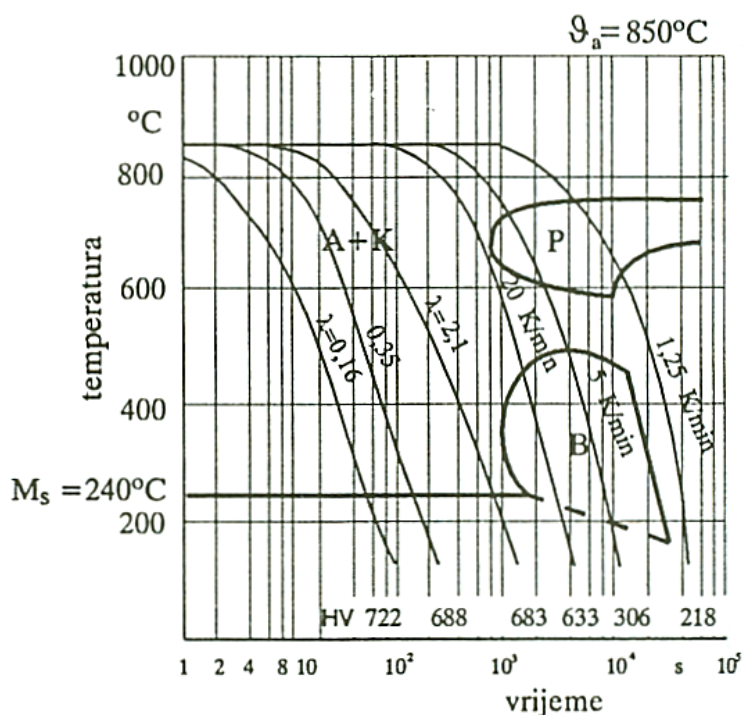
popuštanja. Upravo zbog toga ova skupina čelika kao i svi ostali za rad u toplom stanju, nužno sadrže Mo ili W.

Osnovni zadatak Mo je povišenje prokaljivosti, povišenje otpornosti na popuštanje i sprječavanje krhkosti popuštanja. Slika 2.6. prikazuje blok dijagram tijeka toplinske obradbe ovih čelika sa zadanim parametrima za pojedinu fazu toplinske obradbe.

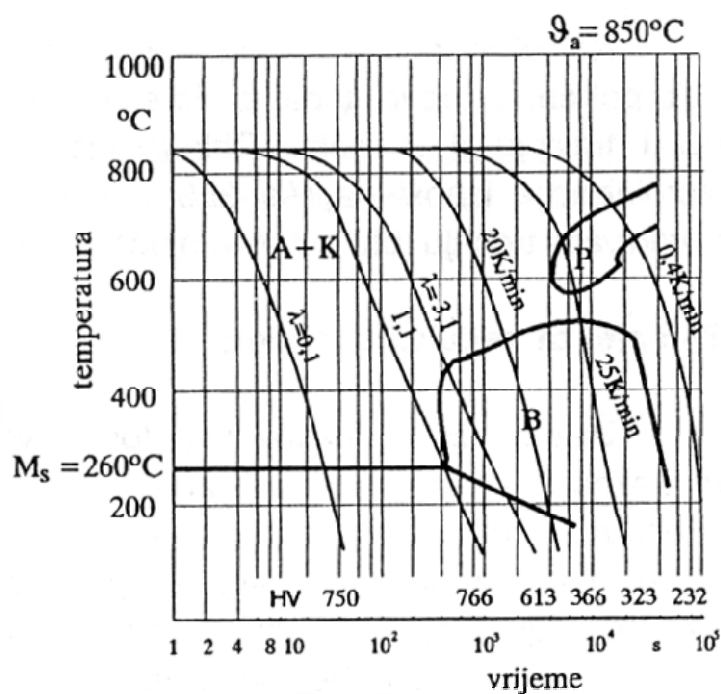


Slika 2.6. Tijek toplinske obradbe niskolegiranih alata za ukovnje [3]

Iz TTT dijagrama (slika 2.7 i slika 2.8) proizlazi da ove čelike treba hladiti u ulju s temperature austenitizacije (830...900°C). Mogućnost povišenja prokaljenja sa znatno više temperature austenitizacije dovelo bi do pogrubljenja zrna i svih negativnih posljedica koje iz toga proizlaze (nika žilavost).



Slika 2.7. TTT dijagram čelika 56 NiCrV 7 [3]



Slika 2.8. TTT dijagram čelika 55 NiCrMoV 6 [3]

Opće razlike ove skupine čelika u odnosu na druge čelike za topli rad su:

- prednost: niska temperatura austenitizacije,
- loša strana: niska otpornost na popuštanje.

Žarenje se kod ovih čelika izvodi za redukciju napetosti nakon intenzivne grube obrade odvajanjem čestica. Trajanje držanja nakon progrijavanja iznosi 2 do 4 sata. Ovi čelici imaju visoku prokaljivost, pa se kod većih presjeka ukovnja može postići jednoličnija tvrdoća po presjeku. [3]

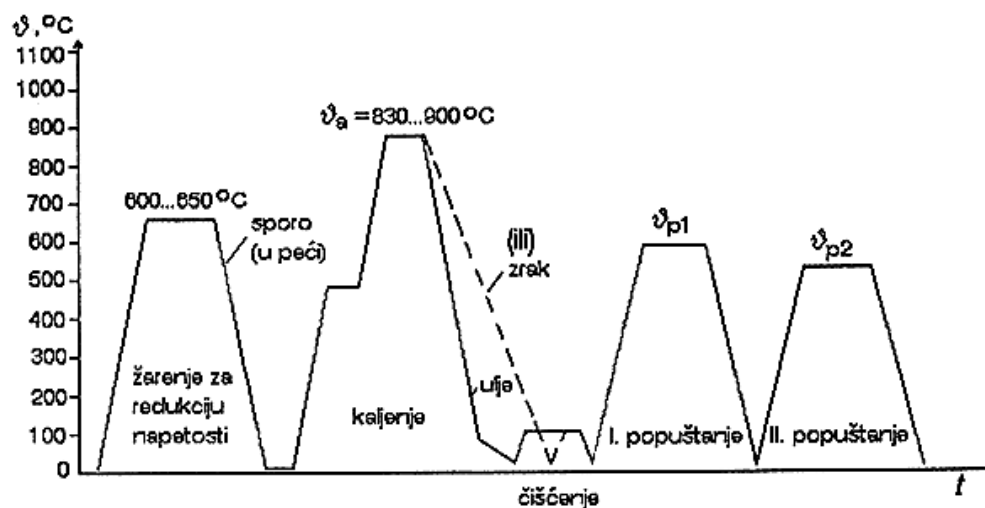
2.2.1.1. Žarenje za redukciju napetosti

Žarenje za redukciju napetosti izvodi se pri temperaturama 600...700 °C te naknadnim sporim ohlađivanjem u peći. Ovo žarenje služi za redukciju napetosti nakon intenzivne grube obradbe odvajanjem čestica (naročito u slučaju kompliciranih alata). Trajanje držanja nakon progrijavanja iznosi 2 do 4 sata.

Uobičajeno žarenje za redukciju napetosti izvodi se u postupku obradbe između predobradbe (grube strojne obradbe odvajanjem čestica) i završne obradbe (fine obradbe odvajanjem čestica). [5]

2.2.1.2.1. Kaljenje

Austenitizacija ovih čelika se izvodi pri temperaturi $\vartheta_a = 800-900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mogućnost povišenja prokaljenja sa znatno više temperature austenitizacije dovelo bi pogrubljenja zrna i svih negativnih posljedica koje iz toga proizlaze. Postupkom kaljenja čelik treba dovesti u martenzitnu strukturu. Gašenjem u ulju sa ϑ_a postiže se tvrdoća 52...58 HRc. Zbog osjetljivosti pri ugrijavanju, alat treba predgrijavati pri temperaturi 550°C (dovoljno dugo da se progrije). Zbog opasnosti od razugljičenja i oksidacije treba upotrijebiti odgovarajuću zaštitu (zaštitnu atmosferu, solna kupka, vakuumaska peć itd.). Na slici 2.9 prikazan je shematski tijek faza toplinske obrade jednog alata izrađenog od niskolegiranog alatnog čelika za topli rad. [3]



Slika 2.9. Tijek faza toplinske obrade niskolegiranog alatnog čelika [3]

2.2.1.3. Popuštanje

Popuštanje treba izvoditi neposredno nakon kaljenja da bi se spriječilo nastajanje pukotina zbog visokih napetosti. Pri popuštanju alat treba jednolično progrijati. Uobičajene temperature popuštanja su od 400 do 700 °C (pri čemu se postiže $R_m=1600....1000 \text{ N/mm}^2$ odnosno tvrdoća 48...30 HRc. Visine temperatura popuštanja izabiru se prema dijagramu popuštanja (prema traženim svojstvima). Trajanje popuštanja treba biti najmanje 2 sata nakon potpunog progrijanja koje traje nekoliko sati. Ohlađivanje sa ϑ_a izvodi se na zraku (ulju) u cilju postizanja minimalnih zaostalih naprezanja. Preporučljivo je izvesti dva popuštanja i to tako da se prvim popuštanjem postigne radna zahtjevna tvrdoća, dok drugo služi za redukciju zaostalih naprezanja.

Tvrdoća popuštanja (temperatura popuštanja) određuje se u ovisnosti o:

- veličini ukovnja i
- dubini gravure. [3][5]

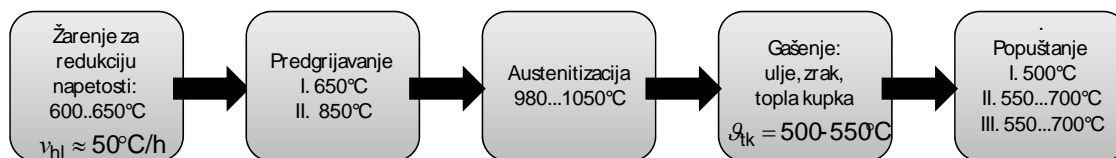
2.2.2. Toplinska obradba visoko legiranih čelika Cr-Mo-V

Osnovne karakteristike ovih čelika su osrednja duktilnost i povišena otpornost na popuštanje. Svi ovi čelici spadaju u skupinu visoko legiranih alatnih čelika koji pri popuštanju imaju izraženu pojavu sekundarnog otvrdnuća. Zbog toga su otporni na popuštanje do oko 540°C gdje i nakon dugog držanja zadržavaju tvrdoću 50...52HRC. Sastav nekoliko najvažnijih čelika ove skupine prikazan je u tablici 2.2. [3]

Tablica 2.2. Oznake i sastav najvažnijih Cr-Mo-V čelika [3]

oznaka čelika				sastav, %					
VDEh	HRN	WNr. DIN 17007	AISI	C	Si	Cr	Mo	V	Mn
X32 CrMoV 3 3	Č7450	1.2365	~H10	0.32		3	3	0.5	
X38 CrMoV 5 1	Č4751	1.2343	~H11	0.4	1	5	1.3	0.4	
X40 CrMoV 5 1	Č4753	1.2344	H13	0.4	1	5	1.5	1	

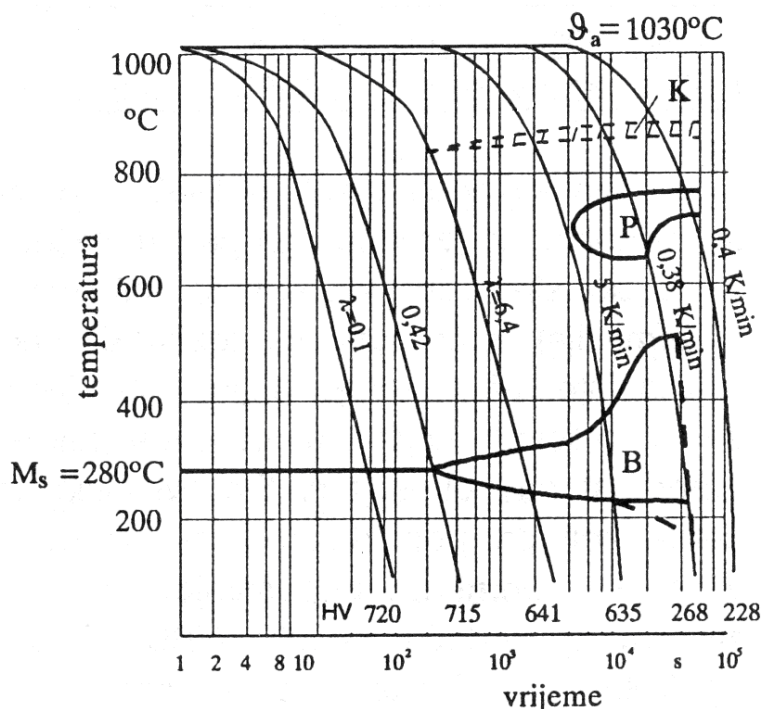
Ovi čelici su visoko legirani alatni čelici visoke žilavosti, vrlo dobrih svojstava u toplom stanju, zakaljivosti i na zraku, čime se postiže visoka dimenzijska postojanost. Slika 2.10 prikazuje blok dijagram tijekom faza toplinske obradbe čelika X38 CrMoV 5 1 sa zadanim parametrima za pojedinu fazu toplinske obradbe i sredstvima za gašenje. [3]



Slika 2.10. Blok dijagram tijekom faza toplinske obradbe čelika X38 CrMoV 5 1 [3]

U procesu rada alata u toplom stanju izvodi se hlađenje komprimiranim zrakom ili uljem a kod čelika X38 CrMoV 5 1 i blago hlađenje vodom. Čelik X38 CrMoV 5 1 je standardni i univerzalni čelik koji nije osjetljiv na nagle promjene temperature. Vrlo je dobre prokaljivosti. Kao što se vidi na TTT dijagramu slika 2.11 vrijeme inkubacije je dugo pa je moguće kaljenje na zraku, čime se ostvaruju samo male deformacije. Primjena ovog čelika je u vrlo širokom intervalu, ali ne i za temperature površinskog sloja preko 500°C.

Čelik X38 CrMoV 5 primjenjuje se za alate za vruće valjanje lakih metala i njihovih legura, za dijelove alata za lijevanje pod tlakom (ali ne preko 500°C). Neosjetljiv je na nagle temperaturne promjene. Ima vrlo dobru kombinaciju svojstva tvrdoće, udarne žilavosti i otpornosti na trošenje. Kaljenje ovog čelika se izvodi na zraku ili ulju pa se može koristiti i za najkompliciranije alate. [5]



Slika 2.11. TTT dijagram čelika X38 CrMoV 5 1 [3]

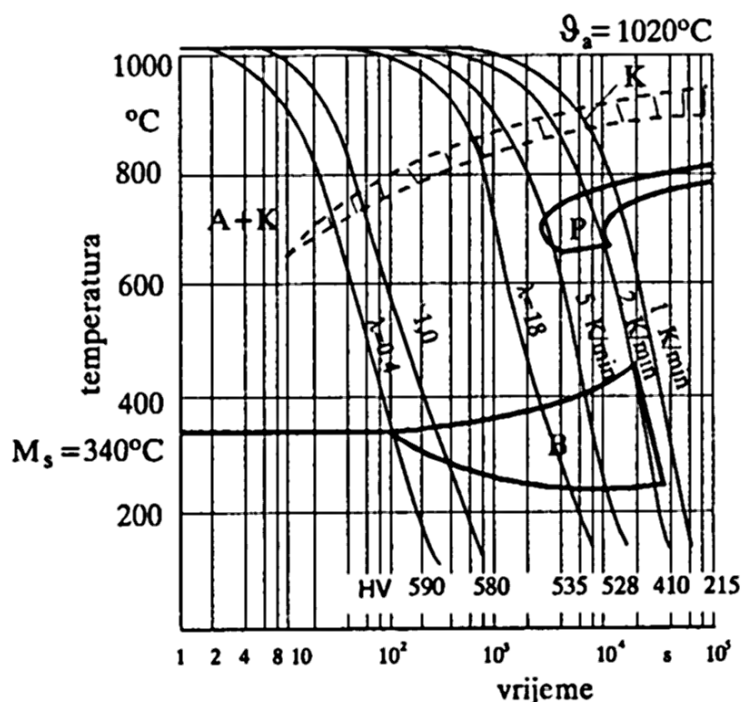
Čelik X40 CrMoV 5 1 sadrži nešto više molibdena i vanadija, ima bolju otpornost prema trošenju na povišenim temperaturama i povećanu otpornost prema popuštanju od čelika X38 CrMoV 5 1. Također ima odličnu prikaljivost. Sekundarno otvrdnjavanje nastaje pri popuštanju na temperaturi 500...550°C.

Izraženo svojstvo ovog čelika je visoka otpornost prema eroziji zbog čega se primjenjuje u izradi alata za tlačno lijevanje. Obzirom da je sklon razugljičenju, pri svim operacijama toplinske obradbe potrebno je obratiti posebnu pažnju. [5]

Slika 2.12 prikazuje blok dijagram tijekom toplinske obradbe čelika X40 CrMoV 5 1 sa zadanim parametrima za pojedinu fazu toplinske obradbe i sredstvima za gašenje.

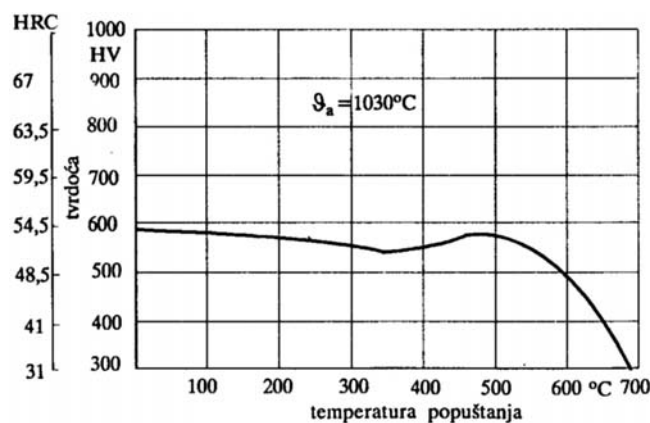


Slika 2.12. Blok dijagram tijekom toplinske obradbe čelika X40 CrMoV 5 1 [3]

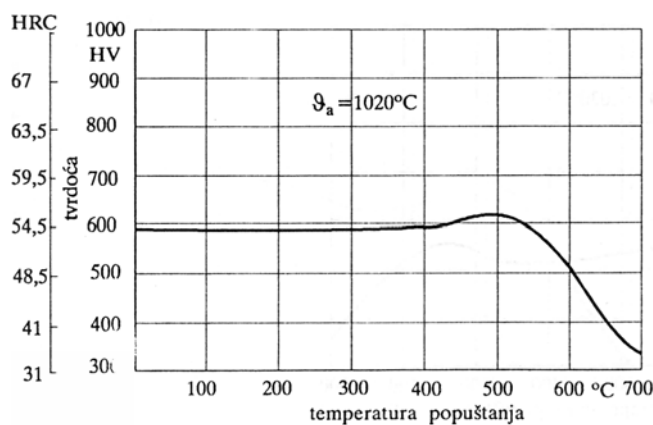


Slika 2.13 TTT dijagram čelika X40 CrMoV 5 1[3]

Kod ovih čelika radi se o visoko legiranim čelicima s Cr, Mo i V. Zbog visokog udjela legirajućih elemenata nedeutektoidnog su sastava. Cr i Mo osiguravaju im visoku prokaljivost a Si, Cr, Mo i V visoku tvrdoću pri povišenim temperaturama. Sam Mo povišuje još i otpornost na krhkost popuštanja. Budući da imaju visoku temperaturu popuštanja ($\approx 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) upotrebljivi su sve do radnih temperatura $750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kao što se vidi na TTT dijagramima (slika 2.11 i slika 2.13) vrijeme inkubacije je dugo pa je moguće kaljenje na zraku, čime se ostvaruju samo male deformacije. U ovim čelicima odlučujući utjecaj na svojstva imaju legirajući elementi. Iz TTT dijagrama (slika 2.11 i slika 2.13) za kontinuirano ohlađivanje je vidljivo da su ovi čelici visoko prokaljivi tj. da se i veliki presjeci alata prokaljuju. Vrijednosti svojstava pri povišenim temperaturama smiju se (kvantitativno) procijeniti na temelju otpornosti na popuštanje. Čelik otporniji na popuštanje pokazuje i više iznose mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama. Žilavost pri povišenim temperaturama kod čelika s 5% Cr rastom temperature konstantno raste. Otpornost na popuštanje ovih čelika prikazuju slike 2.14 i 2.15. [3]



Slika 2.14. Dijagram popuštanja čelika X38 CrMoV 5 1 [3]



Slika 2.15. Dijagram popuštanja čelika X40 CrMoV 5 1 [3]

2.2.2.1. Žarenje

Žarenje za redukciju napetosti izvodi se pri temperaturama 600...650°C u cilju smanjenja rizika deformacije alata pri kaljenju. Trajanje žarenja je obično 2 do 4 sata nakon potpunog progrijavanja. Hlađenje se izvodi sporo s ohlađivanjem u peći.[3]

2.2.2.2. Prokaljivost i postupci kaljenja

Zbog visoke prokaljivosti od ovih se čelika izrađuju veliki kalupi za rad u vrućem stanju. Iz njihovih TTT dijagrama (slika 2.11 i 2.13) proizlazi da im je v_{kg} niska (duga inkubacija), pa su zakaljivi i na zraku. To će omogućiti prokaljenje po čitavom presjeku i u slučaju debelih presjeka. Čelik X40 CrMoV 5 1 ima nešto višu prokaljivost od čelika X38 CrMoV 5 1 što se vidi iz usporedbe njihovih TTT dijagrama (slika 2.11 i 2.13). Čelik X40 CrMoV 5 1 najbolje je prokaljiv, a uz to sadrži bitno više karbida u kaljenom stanju što povišuje otpornost na trošenje. Povišena temperatura M_s omogućuje manje zaostalog austenita u čeliku X40 CrMoV 5 1 nego u X38 CrMoV 5 1. Čelik sa najviše zaostalog austenita u kaljenoj strukturi ima najnižu tvrdoću u kaljenom stanju ali i najveću tvrdoću nakon popuštanja.[3][5]

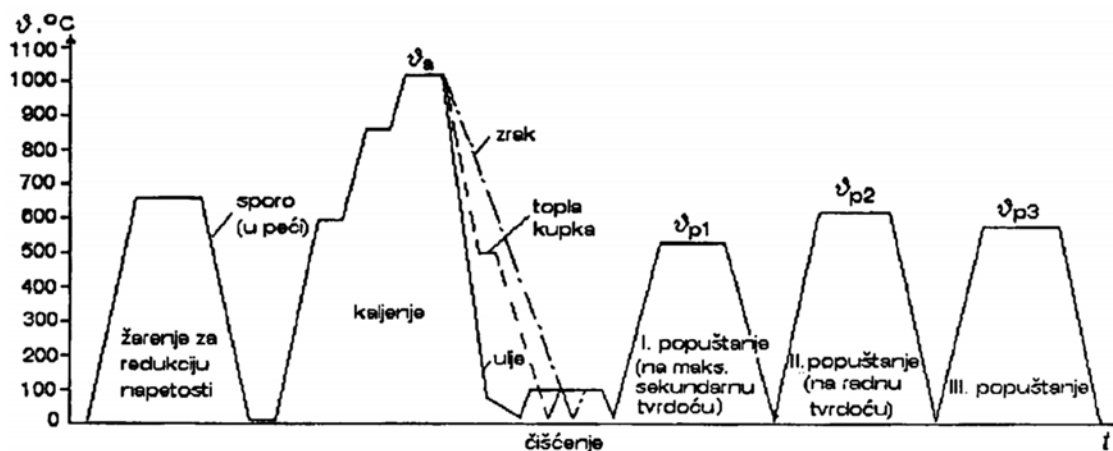
2.2.2.3. Kaljenje

U cilju sprječavanja razugljčenja i oksidacije, austenitizaciju treba provoditi u odgovarajućoj zaštiti (zaštitna atmosfera, solna kupka ili vakuumska peć). Budući da se radi o osjetljivim čelicima, prije ugrijavanja alate treba predgrijavati. Potrebno je izvesti barem dva predgijavanja i to:

- I. predgijavanje pri temperaturi oko 650 °C,
- II. predgrijavanje pri temperaturi oko 850°C.

Trajanje predgrijavanja treba biti toliko dugo da se alat progrije. Temperature austenitizacije za ovu vrstu čelika su 980....1050 °C.

Kod čelika X40 CrMoV 5 (prema normi AISI „H13“) visok udio volframa omogućuje primjenu većeg raspona temperatura austenitizacije (nema opasnosti od rasta zrna) pa se i visinom \mathcal{G}_a može utjecati na prokaljivost čelika. U novije vrijeme kaljenjem alata u vakuumskoj peći postižu se izvrsna svojstva uz minimalne deformacije. Slika 2.16 predočava shematski tijek obradbe alata od ovih čelika.[3]



Slika2.16. Shematski prikaz faza toplinske obradbe alatnih čelika Cr-Mo-V [3]

Gašenje ovih alata najčešće se provodi u ulju, inertnom plinu (npr. strujanje dušika) a također je primjenjivo i gašenje u toploj kupki temperature 500...550 °C. Ovakvim gašenjem snizuju se toplinska naprezanja i postižu se manje deformacije nakon kaljenja. No treba računati da će se u slučaju gašenja na zraku dobiti nešto niža čvrstoća, zbog nastanka bajnita i većeg udjela zaostalog austenita, što će utjecati i na visinu temperature maksimalnog sekundarnog otvrdnuća i tvrdoću nakon popuštanja (vidi tablicu 2.3), a i na žilavost.[3]

Tablica 2.3. Utjecaj načina gašenja na tvrdoću kaljenog i popuštenog stanja [3]

čelik	t_a °C	Sredstvo za gašenje	tvrdoća nakon gašenja, HRc	maksimalna sekundarna tvrdoća, HRc	temperatura popuštanja pri kojoj se postiže maksimalna sekundarna tvrdoća, °C
X38 CrMoV 51	1000..1300	ulje, zrak	≈ 55	≈ 54	475
X40 CrMoV 5 1	1000	Zrak	≈ 52	≈ 52	530
		Ulje	≈ 52	≈ 53	500
	1080	Zrak	≈ 54	≈ 55	550
		Ulje	≈ 56	≈ 56	520

2.2.2.4. Popuštanje

Najčešće se alati iz ove skupine čelika toplinski obrađuju na tvrdoće 35-45 HRc (za jaka udarna opterećenja nešto niže). Kao i u slučaju drugih alatnih čelika, i ove alate treba odmah nakon kaljenja popustiti, budući da su nakon kaljenja puni zaostalih naprezanja i krhki.

Ovi će alati raditi pri povišenoj temperaturi, pa će ih trebati popustiti pri temperaturi popuštanja koja je viša od radne. Budući da ovi čelici imaju pojavu sekundarne tvrdoće, alat će trebati popuštati najmanje dva puta, a preporuča se trostruko popuštanje i to:

- I. popuštanje na maksimalnu sekundarnu tvrdoću,
- II. popuštanje na radnu tvrdoću i
- III. popuštanje na temperaturu 30-50 K ispod temperature drugog popuštanja radi sniženja napetosti.[5]

2.2.3. Visokolegirani W-Cr-V čelici za kalupe za tlačno lijevanje

Osnovne karakteristike ove skupine alatnih čelika su visoka tvrdoća i visoka otpornost trošenju u toplom stanju. Najvažniji predstavnici ovih čelika su X30 WCrV 4 1 (Č6450) i X30 WCrV 9 3 (Č6451). Kako se vidi iz tablice 2.4, radi se o čelicima u kojim je umjesto Mo dodan W, čime se postiže povišenje otpornosti na popuštanje, ali na račun žilavosti.[3]

Tablica 2.4. Oznake i sastav najvažnijih W-Cr-V čelika [3]

oznaka čelika				sastav, %				
VDEh	HRN	WNr. DIN 17007	AISI	C	Si	Cr	W	V
X30 WMoV 4 1	Č6450	1.2564	-	0.3	1	1	4	0.4
X30 WMoV 9 3	Č6451	1.2578	~H21	0.3		2.5	9	0.4

Prisustvo volframa u ovim čelicima je u obliku karbida, što zahtijeva zagrijavanje na vrlo visoke temperature u cilju kaljenja.

Popuštanjem na temperaturama 550...700°C rastvaraju se i izlučuju disperzni i postojani protiv koagulacije karbidi volframa što zadržava pad tvrdoće i čvrstoće.

Ovi karbidi su smješteni na granicama zrna što umanjuje plastičnost i udarnu žilavost. To znači da volfram pogoršava toplinsku vodljivost. [10]

Čelik X30 WCrV 9 3 je najotporniji čelik na popuštanje od svih ostalih čelika za topli rad.

Karakteristike primjene ovih čelika su:

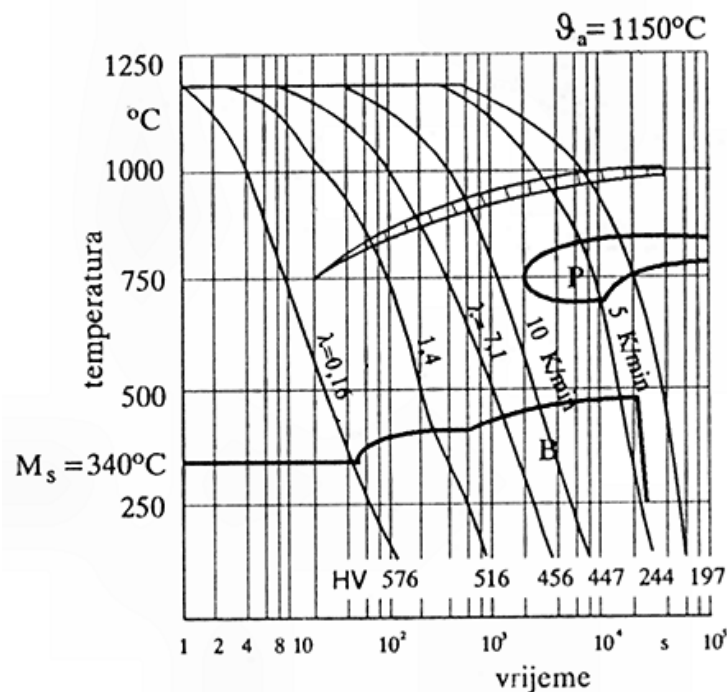
- maksimalno tražena R_m u toplom stanju (teoretski upotreba do 850°C),
- maksimalno tražena otpornost na popuštanje,

ali tek kad je žilavost sekundarne važnosti.

Slika 2.17 prikazuje blok dijagram tijekom toplinske obradbe čelika X30 WMoV 9 3 sa zadanim parametrima za svaku pojedinu fazu toplinske obradbe.



Slika 2.17. Blok dijagram tijekom toplinske obradbe čelika X30 WMoV 9 3 [3]

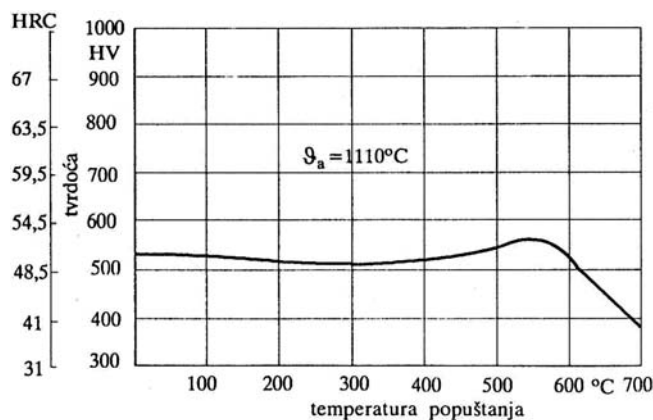


Slika 2.18. TTT dijagram čelika X30 WCrV 9 3 [3]

Kao što se vidi iz TTT dijagrama (slika 2.18) čelik X30 WCrV 9 3 je visoko prokaljiv, može se hladiti i na zraku, no za maksimalnu tvrdoću će trebati brže gašenje. Iz TTT dijagrama zaključuje se sljedeće:

- temperatura Ms je visoka ($\approx 330^{\circ}\text{C}$),
- trajanje pretvorbe u bajnitnom stupnju je prekratko,
- postoji područje tromosti austenita (što je poželjno te se i veliki alati mogu kaliti u toploj kupki).

Posljedice toga su da se očekuje manje zaostalog austenita nakon gašenja nego kod Cr-Mo-V čelika. Relativno kratkotrajna transformacija u bajnitnom stupnju ukazuje na sklonost čelika pretvorbi u bajnit, te najvjerojatniju strukturu nakon gašenja, smjesu bajnita i martenzita (samo za manje dimenzije alata i oštrije gašenje moguće je postići čisti martenzit). Otpornost prema popuštanju do 600°C je vrlo visoka što ilustrira slika 2.19.



Slika 2.19. Dijagram popuštanja čelika X30 WCrV 9 3 [3]

Iz sastava ovih čelika vidi se da se radi o visoko legiranim čelicima. Osnovni legirajuću element je W, uz koji dolaze još Cr i V dok je udio ugljika nizak, oko 0.3%. Ovi čelici imaju izrazito nizak stupanj toplinske vodljivosti te su osjetljivi pri ugrijavanju. [3]

2.2.3.1. Žarenje

Žarenje za redukciju napetosti se izvodi obično nakon grube strojne obradbe, a u cilju redukcije zaostalih naprezanja. Ta naprezanja bi pri naknadnoj toplinskoj obradbi prouzročila nedopuštene deformacije alata. Žarenje se izvodi pri temperaturama 600...650°C u trajanju od 2 do 6 sati. Alat treba hladiti vrlo sporo u peći kako bi se spriječilo stvaranje novih toplinskih napetosti u alatu. [3]

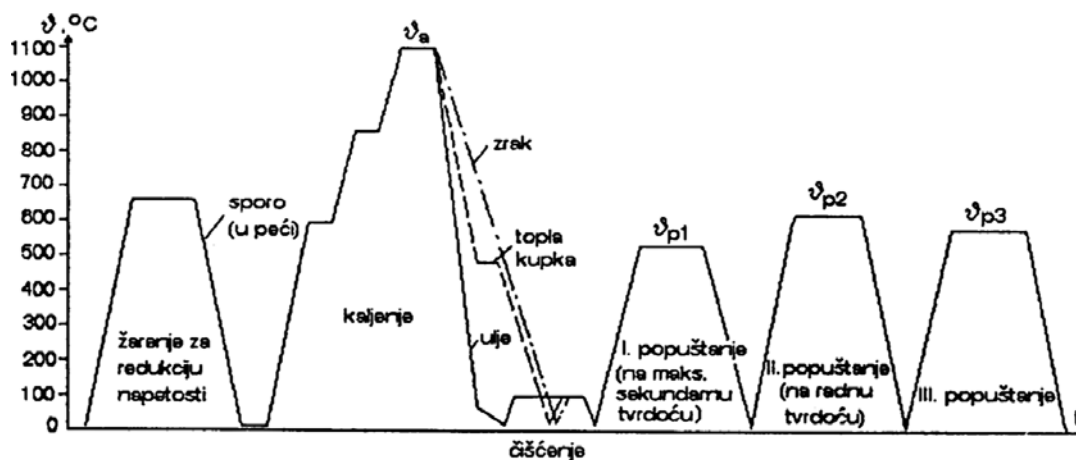
2.2.3.2. Kaljenje[3][5]

Temperatura austenitizacije za niže legirani čelik X30 WCrV 4 1 iznosi od 960°C do 1000°C za gašenje u vodi ili od 1000 do 1040°C za gašenje na zraku. Za čelik X30 WCrV 9 3 temperature austenitizacije su 1080-1160°C. Kaljenjem sa niže \mathcal{Q}_a dobit će se viša žilavost ali i niža otpornost na popuštanje, dok je za slučaj kaljenja sa više \mathcal{Q}_a obrnuto.

Zbog niske toplinske vodljivosti, sva ugrijavanja do temperature A₁ nužno trebaju biti spora, odnosno alat treba barem dva puta predgrijavati i to:

- I. predgrijavanje pri temperaturi 650°C,
- II. predgrijavanje pri temperaturi 850°C.

Trajanje predgrijavanja treba biti toliko dugo da se alat progrije. Tijekom drugog predgrijavanja alat treba zaštititi od površinskih reakcija. Najčešće se za austenitizaciju rabe peći sa zaštitom atmosferom ili što je danas često, vakuumske peći. Time se postižu dobra svojstva uz minimalne deformacije. U slučaju kaljena jednostavnijih alata (malih i srednjih dimenzija) može se rabiti i inertna solna kupka. Slika 2.20 predočava shematski tijek faza toplinske obradbe alata od ovih čelika.



Slika 2.20. Shematski prikaz faza toplinske obradbe W-Cr-V visokolegiranih alatnih čelika [3]

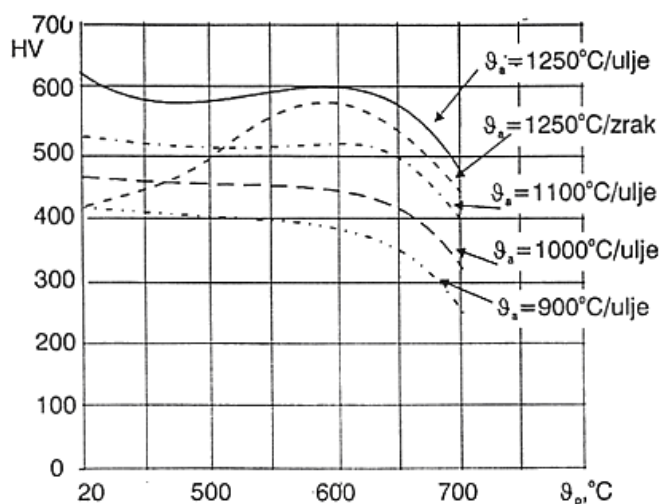
Alati od čelika X30 WCrV 4 3 kale se u ulju (viša temperatura austenitizacije) ili u vodi (niža temperatura austenitizacije).

Pri gašenju čelika X30 WCrV 9 3 primjenjuju se sljedeće tehnike gašenja:

- direktno gašenje ulje/zrak (u ulju se drži dok površina ne pocrni, a dalje se hladi na zraku),
- gašenje u toploj kupki pri 500...550°C i hlađenje na zraku do sobne temperature (u slučaju debljih presjeka, alat iz tople kupke treba ohladiti u ulju u cilju izbjegavanja nastajanja banitne strukture),
- gašenje u struji zraka (ili bolje, u struji inertnog ili plemenitog plina, kao npr.: dušika, argona helija). [3][5]

2.2.3.3. Popuštanje

Utjecaj temperature austenitizacije na rezultate popuštanja čelika X30 WCrV 9 3 predočava slika 2.21. Najotporniji na popuštanje je visokoaustenitizirani čelik X30 WCrV 9 3 te je moguća njegova primjena do radnih temperatura 600...700 °C. Kad se primarno traži visoka toplinska otpornost, trebat će austenitizirati na visokoj temperaturi austenitizacije (povišenjem ϑ_a povisuje se i temperatura popuštanja za postizanje maksimalne tvrdoće). Izlučivanje karbida ovisno o temperaturi popuštanja predočava tablica 2.5.



Slika 2.21 Utjecaj visine temperature austenitizacije na tvrdoću kaljenog i popuštenog stanja [3]

Tablica 2.5. Izlučivanje karbida ovisno o temperaturi popuštanja [3]

temperatura popuštanja, °C	prisutni karbidi
500	Fe ₃ C
625	W ₂ C
650	W ₂ C
675	W ₂ C+M ₆ C
700	M ₆ C+ W ₂ C
750	M ₆ C
800	M ₆ C+ M ₂₃ C ₆

Slijedi da se maksimalna sekundarna tvrdoća postiže kada dolazi do izlučivanja karbida W₂C. Kad bi radna temperatura bila 650...700 °C, radna ploha bi težila bržem mekšanju nego jezgra. Zbog toga bi došlo do napetosti koje bi mogle dovesti do prvih pukotina. [3]

2.3. Određivanje parametara toplinske obradbe

2.3.1. Austenitizacija [6]

Austenitizacija je postupak u kojem se čelik ili željezni ljev ugrijavaju i drže na temperaturi iznad temperature A_1 da bi im se mikrostruktura potpuno ili djelomično pretvorila u austenit. Austenitizacija uobičajeno predstavlja prvu fazu u različitim postupcima toplinske obrade (npr. pri kaljenju, normalizacijskom žarenju, pougljičavanju i dr.). Temperature austenitizacije alatnih čelika uglavnom su više od onih za konstrukcijske čelike zbog otapanja dovoljne količine karbida i postizanja potrebnog sadržaja ugljika otopljenog u austenitu. Legirani alatni čelici imaju slabiju vodljivost topline od konstrukcijskih čelika pa postoji opasnost pojave velikih temperaturnih razlika i toplinskih naprezanja između površine i jezgre alata te ih je nužno sporo ugrijavati na temperaturu austenitizacije (uz predgrijevanje). Zbog visoke temperature austenitizacije legiranih alatnih čelika povećana je opasnost od razugljičenja i oksidacije površine. Pri grijanju u vakuumskim pećima postoji i opasnost od selektivnog isparavanja legirajućih elemenata s površine čelika uslijed visokih temperatura i sniženog tlaka u vakuumskoj komori. Za uspješnu provedbu austenitizacije treba odrediti slijedeće parametre:

- temperaturu austenitizacije,
- režim ugrijevanja na temperaturu austenitizacije,
- vrijeme austenitizacije (vrijeme grijanja),
- vrstu i sastav zaštitne atmosfere.

2.3.1.1. Određivanje temperature austenitizacije [6]

Temperatura austenitizacije \mathcal{G}_a određuje se u odnosu na temperature A_1 ili A_3 i to:

- iz dijagrama (TTT, Fe-C, pseudobinarnih Fe-C),
- na temelju empiričkih izraza ili
- iz različitih stručnih priručnika proizvođača čelika.

Temperatura austenitizacije pri konvencionalnom ugrižavanju (npr. plinska ili električna peć, vakuumaska peć, solna kupka):

- a) podeutektoidni čelici: $\mathcal{G}_a = A_3 + (30 \dots 70^\circ \text{C})$,
- b) nadeutektoidni čelici: $\mathcal{G}_a = A_1 + (50 \dots 70^\circ \text{C})$.

2.3.1.2. Režim ugrižavanja na temperaturu austenitizacije [7]

Za kvalitetnu izvedbu toplinske obradbe važno je utvrditi režim ugrižavanja na temperaturu \mathcal{G}_a . Razlikuju se dvije brzine ugrižavanja:

- tehnički moguća (ovisno o opremi i mediju, razlici temperatura, obliku i rasporedu obradaka),
- tehnološki dozvoljena (ovisi o konfiguraciji obratka i strukturi materijala).

Tehnički dozvoljena brzina ugrižavanja treba osigurati ugrižavanje bez nastanka pukotina. Osjetljivost na pukotine pri ugrižavanju određuju se pomoću izraza za izračunavanje ekvivalenta ugljika (C ekvivalenta):

$$C_{\text{ekv}} = C + \frac{\text{Mn}}{5} + \frac{\text{Cr}}{4} + \frac{\text{Mo}}{3} + \frac{\text{Ni}}{10} + \frac{\text{V}}{5} + \frac{\text{Si} - 0.5}{5} + \frac{\text{Ti}}{5} + \frac{\text{W}}{10} + \frac{\text{Al}}{10}$$

Ugljik i legirajući elementi utječu različito na tu osjetljivost. Čim je više C i legirajućih elemenata, manja je toplinska vodljivost, a time veće unutarnje napetosti radi veće razlike temperature između površine i jezgre.

Gornji izraz vrijedi za sadržaje elemenata do slijedećih vrijednosti 2%Al, 0.9%C, 1.1%Mn, 1.8%Cr, 0.5%Mo, 5%Ni, 0.25%V, 1.8%Si, 0.5%Ti i 2%W. U zavisnosti C_{ekv} čelik se prilikom ugrijavanja mora predgrijavati (jednom ili više puta). Kod srednje i visoko legiranih alatnih čelika pojedini elementi prekoračuju gore navedene vrijednosti, pa izračunavanje C_{ekv} nema smisla. Ove čelike ubrajamo u osjetljive pri ugrijavanju pa ih uvijek treba predgrijavati i to prema slijedećim preporukama:

- I. predgrijavanje na 400-500 °C (sve vrste alatnih čelika),
- II. predgrijavanje na 860-880°C (visokolegirani alatni čelici sa $M_s = 960...1150^{\circ}\text{C}$ imaju I. + II. predgrijavanje),
- III. predgrijavanje na 1050 °C (brzorezni čelici imaju I. + II. + III. predgrijavanje).

2.3.1.3. Određivanje vremena austenitizacije (grijanja) [6] [7]

Vrijeme grijanja određuje se pojedinačno za obradak, odnosno šaržu primjenom različitih analitičkih metoda (npr. prema Ordinanzu, Smoljnikovu ili Newtonu) ili numeričkih metoda (npr. konačnih diferencija, kontrolnih volumena ili konačnih elemenata). Na iznos vremena austenitizacije utječu čimbenici koji ovise o samom obratku, izabranim tehnološkim parametrima te uređajima (postrojenjima) u kojima se provodi grijanje.

Veliki broj čimbenika utječe na vrijeme grijanja:

čimbenici koji ovise o obratku:

- dimenzija,
- masa,
- oblik,
- površina,
- koeficijent toplinske vodljivosti,

tehnoški parametri:

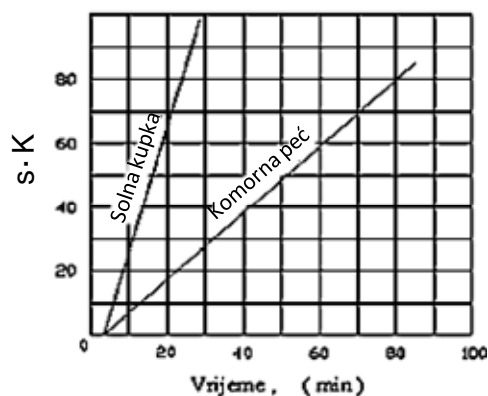
- temperatura,
- broj obradaka,
- raspored obradaka,

samo postrojenje:

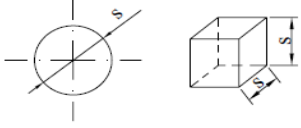
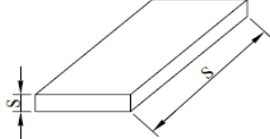
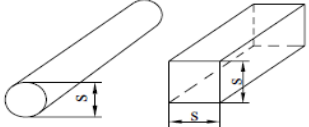
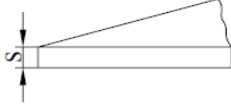
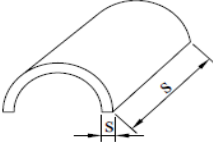
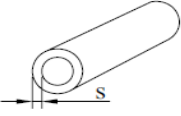
- vrsta,
- veličina,
- način ugrađivanja,
- raspored temperature,
- temperatura,
- prijelaz temperature,
- medij.

2.3.1.3.1. Određivanje vremena grijanja (tgr) metodom Ordinanz [6] [7]

Ova metoda uzima u obzir kemijski sastav čelika, oblik, dimenzije obratka i medij u kojem se izvodi ugrijavanje. Oblik i dimenzije obratka obuhvaćene su iskustvenim faktorom "K" određenim prema nekoj karakterističnoj dimenziji obratka "s". Karakteristična dimenzija "s" je dimenzija na obratku u čijem smjeru se pri ugrijavanju odvodi najveća količina topline. Slika 2.22 prikazuje graf gdje je vrijeme grijanja u zavisnosti od "s·K".



Slika 2.22. Vrijeme grijanja u zavisnosti od "s·K" [7]

Oblik i dimenzije s (mm)	Faktor oblika K	Oblik i dimenzije s (mm)	Faktor oblika K
	0,70		1,5
	1,0		2,0
	1,5		2 kratke cijevi «otvorene» 4 duge cijevi «zatvorene»

Slika 2.23. Karakteristična dimenzija " s " i koeficent " K " za neke obratke [7]

Za određeni oblik obratka određuje se faktor oblika " K " i dimenzija " s " (slika 2.23). Prema umnošku " $s \cdot K$ " za određeni uređaj za grijanje određuje se vrijeme grijanja (pojedinačnog obratka). Ako se istovremeno ugrijava više obradaka treba uzeti u obzir njihovu količinu i način šaržiranja.

2.3.1.3.2. Određivanje vremena grijanja metodom Newton [6] [7]

Metoda proračuna vremena grijanja prema Newton-u polazi od pretpostavke o mogućem zanemarivanju temperature raspodjele po volumenu ugrižavanog obratka u slučaju kad se radi o materijalu visoke toplinske vodljivosti (tzv. "termodinamički tankom" predmetu).

Ova pretpostavka je praktički ispunjena ako je ispunjen slijedeći uvjet:

$$Bi = \frac{\alpha \left(\frac{V}{A} \right)}{\lambda} \leq 0.25$$

α ... koeficijent (konvekcijskog) prijelaza topline, W/m^2K

λ ... koeficijent toplinske vodljivosti, W/mK

V/A ... omjer volumena i površine obratka, m

Bi ... Biotov broj (značajka), 1

Za termodinamički masivnije predmete ($Bi > 0,25$) kod kojih se pojavljuje značajnija razlika temperatura između površine i jezgre pri ugrižavanju (i ohlađivanju) uvodi se koeficijent usporenja ugrižavanja ε koji se računa ovisno o obliku obratka:

- za ploču
$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{3} Bi}$$

- za valjak
$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{3.5} Bi}$$

- za kuglu
$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{1}{3} Bi}$$

Jednadžba za proračun vremena grijanja izvodi se iz jednadžbe toplinske ravnoteže obratka i peći. Njen konačni oblik dan je jednadžbom:

$$t_{gr} = \frac{\left(\frac{V}{A}\right) \rho \cdot c}{\alpha \cdot \varepsilon} \ln \left(\frac{\vartheta_{pe \acute{c}} - \vartheta_{po \acute{c}}}{\vartheta_{pe \acute{c}} - \vartheta_{zavr}} \right), \quad s$$

α ... koeficijent (konvekcijskog) prijelaza topline, W/m^2K

ε ... koeficijent usporjenja ugrijavanja, 1

c ... specifični toplinski kapacitet za interval temperatura $\vartheta_{po \acute{c}} - \vartheta_{pe \acute{c}}$, J/kgK

ρ ... gustoća (za čelike = 7800), kg/m^3

V/A ... omjer volumena i površine obratka,

Bi ... Biotov broj (značajka), 1

$\vartheta_{pe \acute{c}}$... temperatura peći, $^{\circ}C$

$\vartheta_{po \acute{c}}$... početna temperatura obratka, $^{\circ}C$

ϑ_{zavr} ... završna temperatura obratka, $^{\circ}C$

Iz jednadžbe slijedi, da bi se za potpuno ugrijavanje (tj. za izjednačenje temperatura ϑ_{zavr} i $\vartheta_{pe \acute{c}}$) trebalo ugrijavati beskonačno dugo. Stoga se za praktičnu primjenu dopuštaju slijedeće vrijednosti:

$$\vartheta_{pe \acute{c}} - \vartheta_{zavr} = 2 \dots 5 \text{ } ^{\circ}C \text{ (za } Bi < 0,5)$$

$$\vartheta_{pe \acute{c}} - \vartheta_{zavr} = 10 \text{ } ^{\circ}C \text{ (za } Bi > 0,5)$$

2.3.2. Određivanje zaštitne atmosfere [6] [7]

Zbog visoke temperature austenitizacije legiranih alatnih čelika povećana je opasnost od razugljenja i oksidacije površine. Pri grijanju u vakuumskim pećima postoji i opasnost od selektivnog isparavanja legirajućih elemenata s površine čelika uslijed visokih temperatura i sniženog tlaka u vakuumskoj komori.

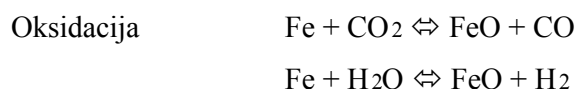
U vakuumskim pećima zbog niskog parcijalnog tlaka kisika (reda veličine 10^{-3} mbara) onemogućeno je oksidiranje površine čelika ali i razugljičenje („oksidacija“ ugljika). U vakuumu je zbog izostanka atmosfere za prijenos topline konvekcijom ugrijavanje znatno sporije negu u plinskoj atmosferi. Tek kod viših temperatura kada prevladava prijenos topline zračenjem (radijacijom) postiže se intenzivniji prijenos topline sa grijača na alat. Novije vakuumske peći sada imaju sustav za zagrijavanje uz uvođenje inertnog plina (dušika N_2) i prinudnu cirkulaciju. Kod temperatura iznad $950^{\circ}C$ u vakuumu oko 10^{-3} mbara moglo bi nastupiti selektivno otapanje kroma i mangana, što se sprječava uvođenjem N_2 i smanjivanjem vakuuma.

Pri toplinskoj obradi čelika površinu strojnih dijelova potrebno je zaštititi od neželjenog djelovanja okolnog medija u kojem se provodi zagrijavanje. Jedan od načina zaštite je primjena kontroliranih zaštitnih atmosfera. Sastav tih atmosfera mora biti prilagođen čeliku koji se obrađuje i temperaturi pri kojoj se toplinska obrada provodi.[5]

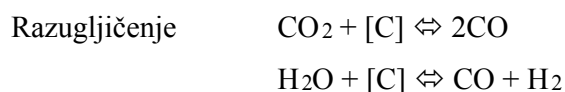
Zaštitne atmosfere mogu biti:

- plinske zaštitne atmosfere (inertne, aktivne),
- rastaljena sol,
- fluidizirane kupke,
- vakuum.

Plinske zaštitne atmosfere sadrže (ovisno o vrsti) različite plinske komponente koje mogu reagirati s čelikom i izazvati nepoželjne reakcije oksidacije i razugljičenja površine obratka.



Izborom odgovarajućeg sastava plinske atmosfere treba spriječiti odvijanje oksidacije čelika, tj. zaštitna atmosfere treba biti reducirajuća.



U plinskoj atmosferi mogu se odvijati nepoželjne reakcije razugljičenja površine čelika koje treba spriječiti izborom odgovarajućeg "C-potencijala" atmosfere.

Reakcija vodenog plina $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$

Odvija se u plinskim atmosferama koje sadrže CO , CO_2 , H_2O i H_2

Svaka plinska atmosfera ima svoj karakterističan C-potencijal ("potencijal ugljika"), tj. onaj %C koji čisto željezo primi u termodinamičkoj ravnoteži s ispitivanom plinskom atmosferom. Ako je C-potencijal plinske atmosfere viši od sadržaja ugljika u čeliku nastupit će pougljičenje, a ako je niži nastaje nepoželjno razugljičenje površine čelika.[6]

Kod visoko legiranih alatnih čelika, unatoč prilagođenom C-potencijalu (radi sprječavanja razugljičenja ili pougljičenja) može nastupiti selektivna oksidacija kroma, najčešće po granicama zrna a zbog odvijanja reakcija:



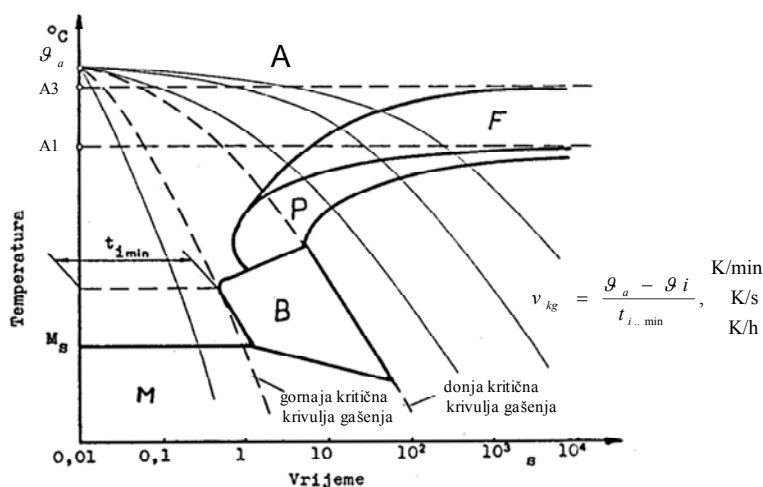
2.3.3. Gašenje i sredstva za gašenje [6] [7]

Da bi se neki alat mogao zakaliti treba ga ohladiti dovoljno brzo s temperature austenitizacije (jedan od četiri uvjeta zakaljivanja). Ovisno o kvaliteti čelika treba odabrati prikladno sredstvo za gašenje kojim će se dobiti čim više mase martenzita. U gašenom stanju u mikrostrukturi alatnih čelika uobičajeno se postiže martenzit, uz prisustvo zaostalog austenita i neotopljenih karbida. Ovakva mikrostruktura je visoke tvrdoće i vrlo niske žilavosti sa visokim iznosima zaostalih naprezanja. [8]

Pri izboru sredstva za gašenje nastoji se odabrati ono "najblaže" koje će još uvijek dati najveći udio martenzita, čime se smanjuje opasnost nastajanja napetosti i eventualnih pukotina.

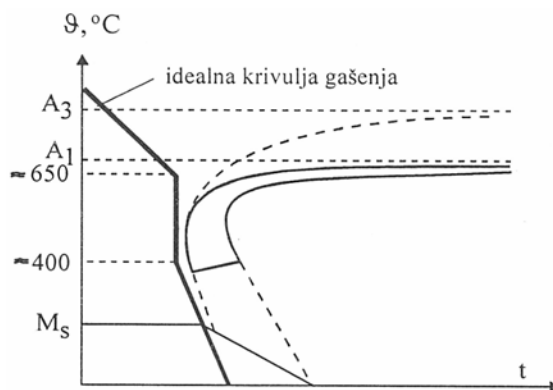
Za određivanje prikladnog sredstva za gašenje uobičajeno se polazi od analize TTT dijagrama za kontinuirano ohlađivanje (vidi sliku 2.24) i u njemu određene gornje, odnosno donje kritične brzine gašenja v_{kg} :

- Gornja kritična brzina gašenja v_{kg} je ona najmanja brzina ohlađivanja kod koje se dobiva potpuno martenzitna mikrostruktura.
- Donja kritična brzina gašenja v_{kd} je ona najmanja brzina ohlađivanja kod koje tek počinje pretvorba u martenzit.



Slika 2.24. Određivanje gornje kritične brzine gašenja v_{kg} iz TTT dijagrama [7]

Iz kontinuiranog TTT dijagrama uočava se kritično područje temperatura (između 650 i 400 °C) oko temperature inkubacije A_i u kojem je potrebno vrlo brzo ohlađivanje da bi se izbjegla pretvorba pothlađenog austenita u perlit ili bainit (vidi idealiziranu krivulju gašenja na slici 2.25).



Slika 2.25. "Idealizirana" krivulja gašenja u TTT dijagramu [2]

Iz iznesenog proizlazi nužnost poznavanja vrsta i karakteristika sredstava za gašenje te fizikalnih fenomena utjecajnih na proces gašenja (npr. Leidenfrostov fenomen, inverzna topivost otopina polimera).

Sredstva za gašenje uobičajeno korištena u toplinskoj obradi čelika mogu se prema svojim fizikalnim svojstvima podijeliti na slijedeće tri skupine:

- I. Sredstva s vrelištem ispod temperature austenitizacije čelika (sredstva podložna Leidenfrostovom fenomenu, tj. stvaranju parnog filma oko obratka na početku gašenja):
 - voda,
 - vodene otopine anorganskih ili organskih tvari (npr. otopine polimera),
 - ulje za kaljenje,
 - emulzije (otopine ulja i vode).
- II. Sredstva s vrelištem iznad temperature austenitizacije čelika (sredstva koja ne podliježu Leidenfrostovom fenomenu):
 - rastaljene soli,
 - rastaljeni metali.
- III. Tehnički plinovi i vakuum (sredstva koja ne podliježu Leidenfrostovom fenomenu):
 - zrak (mirni, komprimirani),
 - inertni plinovi: dušik, helij, argon,
 - fluidizirane čestice.

Ovisno o sredstvima za gašenje i obliku obratka, navedene faze:

- pojavljuju se u različitim vremenskim periodima od početka gašenja,
- različite su intenzitetu ohlađivanja,
- simultano se pojavljuju na obratku.

2.3.4. Popuštanje

Kaljene alatne čelike mora se popuštati odmah nakon gašenja, ugrijavanjem na određenu temperaturu ispod temperature A_1 . Trajanje popuštanja je uobičajeno 1 do 2 sata uz sporo hlađenje s temperature popuštanja. Kod visokolegiranih alatnih čelika postupak popuštanja treba ponoviti dva ili čak tri puta da bi se izlučili karbidi popuštanja i uklonio zaostali austenit čime se postiže povoljna kombinacija svojstava poput tvrdoće, žilavosti, otpornosti na trošenje. Popuštanje je postupak ugrijavanja kaljenog čelika na temperaturu između između 20°C i temperature A_1 u svrhu:

- povišenja žilavosti martenzita postignutog kaljenjem,
- smanjenje zaostalih naprezanja martenzita,
- postizanja dimenzijske postojanosti (kod visokolegiranih alatnih čelika).

Prema visini temperature popuštanja (ϑ_p) postupci popuštanja dijele se na :

- niskotemperaturno popuštanje
($\vartheta_p < 200^{\circ}\text{C}$),
- srednjetemperaturno popuštanje
($220^{\circ}\text{C} < \vartheta_p < 400^{\circ}\text{C}$),
- visokotemperaturno popuštanje
($400^{\circ}\text{C} < \vartheta_p < A_1$).

Nakon kaljenja u čeliku je postignuta martenzitna mikrostruktura s tetragonalnom kristalnom rešetkom. Ugrijavanjem kaljenog čelika, ovisno o visini temperature popuštanja, odvijaju se procesi difuzije atoma ugljika, željeza, legirajućih elemenata; sniženja stupnja tetragonalnosti, nastajanja karbida popuštanja i pretvorbe zaostalog austenita. Ovi procesi su difuzijskog karaktera, pa se jednak učinak popuštanja može postići:

- višom temperaturom popuštanja uz kraće vrijeme popuštanja ili
- nižom temperaturom popuštanja uz dulje vrijeme popuštanja.

Popuštanje kaljenog čelika je nužno provesti nakon gašenja i to na temperaturu višu od one na kojoj će čelik biti izložen u eksploataciji. Popuštanjem se redovno snizuje tvrdoća postignuta kaljenjem, ali to sniženje nikako nije cilj, nego samo nužna posljedica popuštanja. Izuzetak od pojave sniženja tvrdoće su visokolegirani alatni čelici (čelici za topli rad i brzorezni čelici) koji, zbog pojave sekundarnog otvrdnuća, nakon popuštanja zadržavaju istu ili postižu čak nešto višu tvrdoću od one u kaljenom stanju. Iznos tvrdoće čelika nakon popuštanja na različitim temperaturama prikazuje se dijagramima popuštanja. Iz njih se može procijeniti i sposobnost čelika da zadrži visoku tvrdoću postignutu kaljenjem unatoč povišenju temperature popuštanja (tj. njegova otpornost na popuštanje). [8]

2.4. Upravljanje procesom toplinske obradbe [9]

Cilj zagrijavanje alata u pećima je dovesti temperaturu na željenu vrijednost na kojoj se odvija očekivani proces. Zadatak regulacijskog sistema je trenutno podešavanje snage peći radi ostvarenja zadane promjene temperature. Mjesto gdje se temperatura mjeri mora biti pažljivo odabrano, s obzirom na nehomogeno temperaturno polje u peći i složene zakonitosti prijenosa topline.

Komponente sustava za upravljanje i regulaciju su:

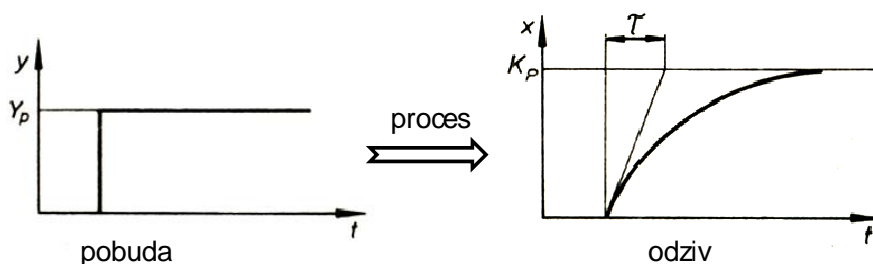
- strojarske - projektiranje mehanizama te primarne tehnologije uz razumijevanje fizikalnih, kemijskih i tehnoloških karakteristika procesa.
- senzori (osjetila) nekog aspekta procesa - omogućavaju nam očitavanja stanja procesa (objekta automatizacije). U našem slučaju mjerenje temperature peći radnog komada radi se o termoparovima. Oni rade na principu razlike napona što je približno linearno razlici temperatura.
- aktuatori - pojačavaju energetske nivo izlaznih signala i prilagođavaju oblik energije potrošačima. U našem slučaju (procesa kaljenja alata) aktuatori će biti grijači. Drugim riječima aktuatori djeluju na proces.
- elektrotehnika - omogućava sučelje prema senzorima i aktuatorima te ostale međuveze.
- informatika - procesira podatke i informacije.
- automatika - upravlja aktuatorima na osnovu stanja sustava i procesa.

U slučaju upravljanja električnom peći za toplinsku obradbu izlazna veličina tj. temperatura mora se mijenjati po unaprijed zadanom programu. Moramo naglasiti da se pri tome proces odvija obično sporo u odnosu prema programskim promjenama. Regulirana veličina (temperatura) kojom želimo upravljati djeluje na ulaz regulacijskog uređaja, gdje se mjeri i uspoređuje s referentnom veličinom. Referentna veličina vremenski je promjenjiva pa je prikladan naziv vodeća veličina. Razlika između regulirane i referentne veličine jest regulacijsko odstupanje koje se pojačava i na izlazu iz regulacijskog uređaja naziva se ponekad postavna veličina. Ona djeluje na ulaz procesa suprotstavljajući se djelovanju poremećajne veličine. Regulacija djeluje tek kada se pojave, bilo slučajno bilo namjerno, odstupanja od zadanog stanja, tj. poremećaji ravnotežnog stanja, a sa svrhom da se ponovno uspostavi ravnotežno stanje.

U slučaju upravljanja procesom toplinske obradbe imamo elemente čvrste i slijedne regulacije. Kod čvrste regulacije zadaća regulatora je da kompenzira utjecaj smetnji koje djeluju na proces. Pri tome regulirana veličina (temperatura) treba stati na određenoj (namještenoj) vrijednosti.

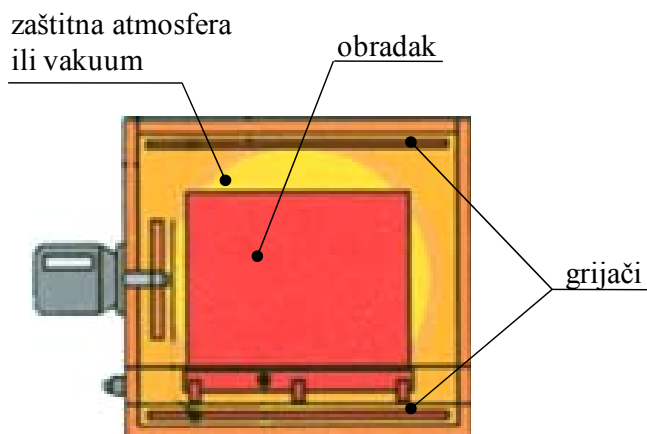
Stabilnost je najvažnije svojstvo regulacijskog sustava, jer je nužan uvjet za tehničku primjenjivost. Regulirani procesi su procesi izjednačavanja između dva stacionarna stanja, pri čemu je najvažniji problem točnosti. Kao treći zahtjev kod regulacije postavlja se brzina odziva kojom se odigrava proces izjednačavanja. Zapravo točnost, stabilnost i brzina odziva osnovni su problemi regulacije.

Regulacija temperature peći za toplinsku obradbu ima zadatak i da suzbija poremećaje i da vodi temperaturu po nekom unaprijed zadanom programu, tj. da izlazna veličina (temperatura) točno slijedi promjene referentne veličine. Regulacijska staza je dio čitavog objekta u kojemu se može utjecati na fizikalnu veličinu koju treba regulirati. U slučaju toplinskih procesa riječ je o proporcionalnim stazama, odnosno stazama s izjednačenjem. Kod staza s izjednačenjem izlazna se veličina nakon poremećaja ustali na novoj vrijednosti razmjerno ulaznoj veličini. Tako se na slici 2.26 vidi da bi, uz postavnu veličinu u obliku odskočne funkcije, staza s izjednačenjem reagirala tako da bi se regulirana veličina (temperatura) ustalila na novoj vrijednosti.[11]



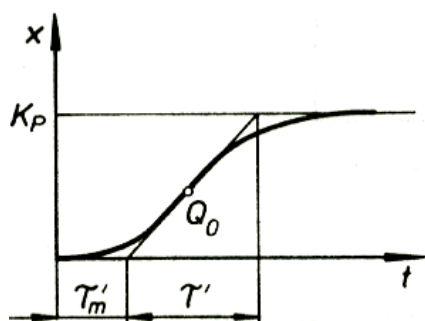
Slika2.26. Odziv sustava na pobudu kod toplinskog procesa [9]

Prijelaz topline općenito, odnosno svi toplinski procesi su proporcionalne staze višeg reda. Toplinske staze često se susreću u regulacijskoj tehnici: pri grijanju i hlađenju. Primjer je električna peć za toplinsku obradbu (slika 2.27).



Slika 2.27. Električna peć za toplinsku obradbu [15]

U otpornom grijaču električna se energija pretvara u toplinsku. Toplinska energija prelazi sa grijača na obradak kroz zaštitnu atmosferu ili vakuum na obradak koji se zagrijava. Temperatura peći ili obratka mjeri se termoparom koji toplinsku energiju pretvara u električni napon. Prijelazna funkcija predstavlja odziv sustava na jediničnu skokovitu pobudu. Snimanje prijelaznih funkcija toplinskog sustava predvodi se eksperimentalnom metodom. Prijelazna funkcija električne peći za toplinsku obradbu (slika 2.27) ima oblik kao na slici 2.28. Na temelju tog odziva (prijelazne funkcije) određuje se nadomjesno mrtvo vrijeme i nadomjesna vremenska konstanta. Iskustvo pokazuje da termoparovi zbog svoje tromosti reagiraju s kašnjenjem. Uključenjem električne struje termopar na početku ne bi pokazivao nikakve promijene, a zatim bi termo napon počeo rasti (na početku polagano, a zatim sve naglije) te bi se konačno asimptotski približavao konačnoj vrijednosti.



Slika 2.28. Odziv toplinskog procesa na skokovitu pobudu [9]

Ako se u točki Q_0 krivulje (slika 2.28) povuče tangenta, mogu se pomoću sjecišta tangente s osi apsise i pravca K_P odrediti dvije značajne veličine za sustav n-tog reda,

nadomjesno mrtvo vrijeme τ'_m i nadomjesna vremenska konstanta τ' odnosno τ i τ_m . To su parametri preko kojih se izračunavaju parametri za podešavanje regulatora. Kod procesnih staza mogućnost regulacije ovisi prije svega o tim veličinama. Njihov omjer služi kao mjera za dobru regulaciju staze. Promjena postavne ili poremećajne veličine na ulazu u stazu izaziva tek nakon nadomjesnog vremena τ_m odgovarajuću promjenu regulirane veličine koja aktivira regulacijski uređaj. Djelovanje uređaja usmjereno je na snimanje regulacijskog odstupanja i postaje djelotvorno na izlazu staze tek nakon ukupno $2 \tau_m$. Dakle, što je veće mrtvo vrijeme staze, to je veće regulacijsko odstupanje. Iskustvo je pokazalo da se u vezi s omjerom τ / τ_m mogu postaviti sljedeći kriteriji za kvalitetu regulacije.

$$\begin{aligned} \frac{\tau}{\tau_m} &\geq 10 \implies \text{dobra regulacija} \\ \frac{\tau}{\tau_m} &\approx 6 \implies \text{regulacija je zadovoljavajuća} \\ \frac{\tau}{\tau_m} &\leq 3 \implies \text{regulacija je otežana} \end{aligned}$$

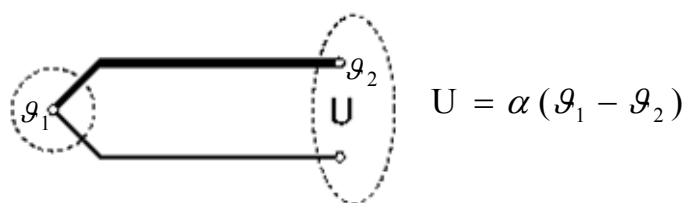
Tablica 2.6 prikazuje parametre procesnih staza.

Tablica 2.6. Nadomjesno mrtvo vrijeme i nadomjesna vremenska konstanta [11]

Regulirana veličina	Staza	τ'_m	τ'
Temperatura	Mala labaratoriska peć	0.5...1 min	5...15 min
	Velika peć	1...3 min	10...20 min

2.4.1. Osjetilo za mjerenje temperature (termopar) [10]

Postoje razni senzori za mjerenje temperature, ali u slučaju peći za toplinsku obradbu alatnih čelika za topli rad koriste se termoparovi. Razlika napona je približno linearna razlici temperatura. Seebeckov koeficijent je mjera termoelektičnog napona ovisna o vrsti materijala. Napon termopara je funkcija razlike temperatura $\vartheta_1 - \vartheta_2$ ($1000^\circ\text{C} \approx 50\text{mV}$). Slika 2.29 prikazuje pojednostavljenu shemu termopara.



Slika 2.29. Pojednostavljena shema termopara,[10]

U napon na izlazu termopara mjeren u milivoltima

α Seebeckov koeficijent koji tipično iznosi od $5\text{-}50 \mu\text{V/K}$

ϑ_1 temperatura mjernog objekta

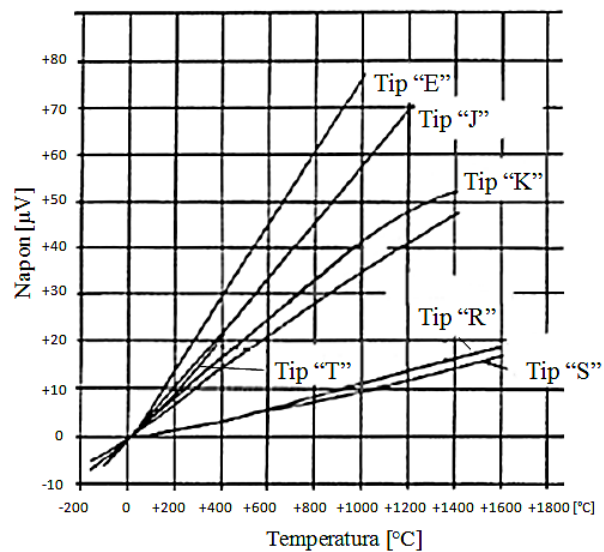
ϑ_2 temperatura okoline

Na tržištu danas postoje razni tipovi termoparova za različita mjerna područja. Tablica 2.7 prikazuje nekoliko tipova termoparova, njihov sastav, preciznost te mjerni raspon temperatura.

Tablica 2.7. Usporedba standardnih termoparova [10]

Parametar	J	K	N	T	R
$\vartheta_{\min} [^\circ\text{C}]$	-40	-200	-230	-250	-50
$\vartheta_{\max} [^\circ\text{C}]$	+850	+1100	+1230	+400	+1350
Točnost $[^\circ\text{C}]$	± 2.5	± 2.5	± 2.5	± 1	± 2
+ materijal	Fe	90%Ni, 10%Cr	84%Ni, 14%Cr, ostalo Si, Fe, C	Cu	Pt
- materijal	55%Cu, 45%Ni	95%Ni, 2%Al, 2%Mn, 1%Si	95%Ni, 4.5%Si, Ostalo Fe, C, Mg, Cr	55%Cu, 45%Ni	7%Pt, 13%Rh
Seebeckov koeficijent $[\mu\text{V/K}]$	50	39	39	39	5

Na slici 2.30 prikazan je odnos mjerene temperature peći i izlaznoga napona termopara za neke standardne termoparove.

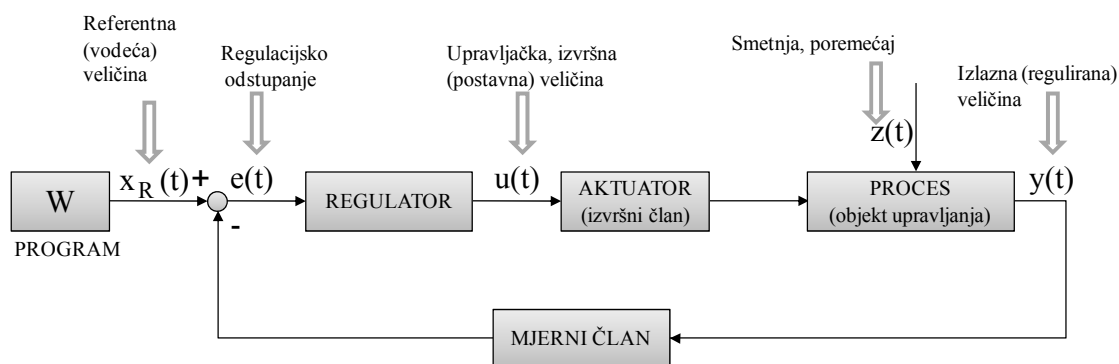


Slika 2.30. Odnos temperature i izlaznog napona iz termopara [10]

2.4.2. Uređaji za regulaciju

Regulacijski uređaj djeluje zajedno s regulacijskim objektom za pravilno odvijanje procesa regulacije. Za razliku od regulacijskog objekta, gdje su struktura i parametri čvrsto zadani, struktura i parametri regulacijskog uređaja mogu se birati u svrhu postizanja optimalnog djelovanja. Regulirana veličina (temperatura) na izlazu iz staze dolazi prvo do mjernog člana (termopara) koji se sastoji od mjernog osjetila i pretvarača. Mjerno osjetilo ima zadatak da mjeri trenutnu vrijednost regulirane veličine. Funkcija pretvarača je da dobiveni signal pretvori i prilagodi za daljnju obradu.

Regulacijski član sastoji se od komparatora, vremenskog člana (P, PI, PD, PID) i regulacijskog pojačala. Regulacijska veličina ulazi najprije u komparator gdje se uspoređuje s nazivnom veličinom, odnosno vodećom veličinom koja dolazi od davača nazivne veličine (programskog kontrolera). Razlika tih dvaju signala naziva se regulacijsko odstupanje. Ono djeluje na vremenski član gdje se signal preoblikuje u skladu sa zahtjevima regulacijskog kruga. Regulacijski signal vodi se dalje u izvršni član (aktuator) tj. u našem slučaju grijač. Slika 2.31 prikazuje zatvoreni regulacijski krug sa PID regulatorom.



Slika 2.31. Shematski prikaz regulacijskog kruga sa povratnom vezom [9]

Djelovanje vremenskog člana može biti proporcionalno, integralno ili derivacijsko obilježje, a može biti i kombinacija tih triju djelovanja. Proporcionalno djelovanje (P) koristi sadašnju regulacijsku pogrešku, integracijsko djelovanje (I) koristi prošlu regulacijsku pogrešku, a derivacijsko (D) koristi buduću regulacijsku pogrešku. [9]

2.4.2.1. PID regulator i iz njega izvedeni regulatori

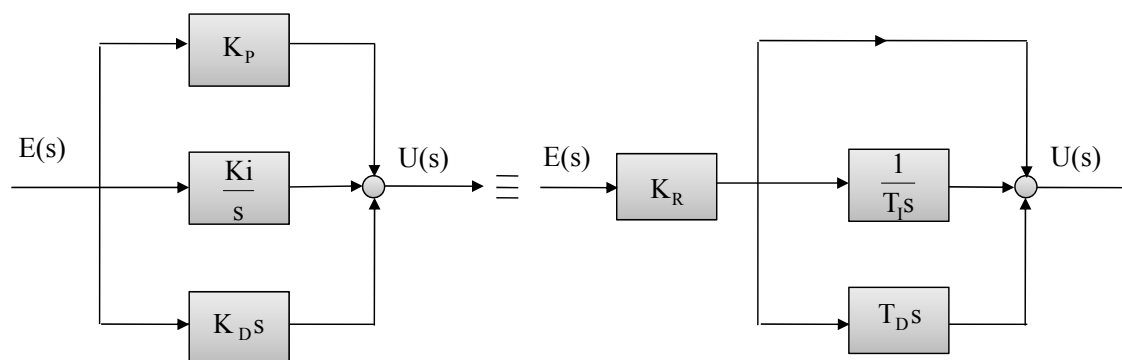
Regulator tvori regulacijsko odstupanje $e(t)=x_R(t)-y(t)$ koje se dalje obrađuje kako bi se dobila upravljačka veličina $u(t)$. Upravljačka veličina osigurava preko izvršnog člana (grijača) kontrolirani tok energije (topline) upravljanim procesu i na taj način držanje ili praćenje regulirane veličine uz djelovanje poremećajnih veličina. Derivacijsko ponašanje poboljšava stabilnost regulacijskog sustava omogućavajući povećanje pojačanja te smanjenje integracijske vremenske konstante T_i , što pridonosi povećanju sposobnosti točnijeg praćenja referentne veličine. Današnja praksa pokazuje kako su u širokoj upotrebi regulatori koji se zasnivaju na P, I, D djelovanju. S problemom topologije (strukture) regulatora susrećemo se kada:

- projektiramo sustav upravljanja, odnosno postavljamo strukturu i parametre regulatora s kojim će se obaviti zadatak,
- ugađamo parametre postojećeg regulatora.

Postoji mnogo različitih struktura PID regulatora. Različiti proizvođači projektiraju PID regulatore na različite načine. No ipak, najčešće se susreću dvije topologije:

- paralelna (neinteraktivna),
- serijska (interaktivna).

Najčešće korišteni standardni regulator PID tipa (paralelne topologije) prikazan je na slici 2.32. [11]



Slika 2.32. Paralelna struktura PID regulatora [11]

Prijenosna funkcija PID regulatora glasi:

$$G_r = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \equiv K_r \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

gdje je:

$K_r = K_p$ koeficijent pojačanja,

$T_i = \frac{K_d}{K_i}$ integralna vremenska konstanta,

$T_d = \frac{K_d}{K_p}$ derivacijska vremenska konstanta,

K_r, T_i, T_d podesivi (ugodivi) parametri regulatora. [9]

Ovi parametri mogu se podešavati u određenom području vrijednosti. Izborom podesivih parametara, regulator se može prilagoditi vladanju procesa tako da se postigne najpovoljnije regulacijsko vladanje sustava. Problem nepoznavanja točnog funkcioniranja nije kritičan ako se kod ručnog podešavanja parametara regulatora držimo određenih pravila koja su dana u tablici 2.8.

Tablica 2.8. Utjecaj parametara regulatora na proces [11]

Parametar	Brzinu	Stabilnost	Točnost
povećanje K_p	povećava	pogoršava	poboljšava
povećanje K_i	smanjuje	pogoršava	poboljšava
povećanje K_d	povećava	poboljšava	nema utjecaja

Parametri PID regulatora mogu se ugađati na više načina. Razlikujemo:

- eksperimentalno ugađanje,
- ugađanje na temelju prethodno obavljenih simulacijskih eksperimenata
- analitičko ugađanje,
- automatsko ugađanje (auto tuning),
- samougađanje.

Automatsko ugađanje PID regulatora (autotuning) novijeg je datuma i obavlja se u stvarnim uvjetima rada sustava. Eksperiment s procesom u zatvorenom krugu obavlja se potpuno automatizirano i temeljem dobivenih parametara iz eksperimenata računaju se parametri PID regulatora koji se potom automatski postavljaju. [11]

2.4.2.2. PD regulator

Poznato je da se toplinski procesi sa dobrom toplinskom izolacijom ponašaju skoro kao integratori. Najznatniji dio energije koji se dobavlja procesu troši se na povišenje temperature, jer je izolacija dobra i gubici topline su neznatni. Takve vrste procesa dopuštaju velika pojačanja, pa nam nije potrebno integracijsko ponašanje regulatora. Toplinska energija kod toplinskih procesa prelazi sa jednog materijala na drugi konvekcijom (npr. industrijska peć), pa kod takvih procesa ne postoji samo dinamika integratora već i druga dinamika s velikom inercijom. Integracijsko ponašanje regulatora bi pogoršalo dinamiku koja je sama po sebi spora. Razlog zbog čega se koristi PD regulator za takve procese leži u činjenici da se temperatura može mjeriti s relativno niskom razinom šuma. [11]

3. PRAKTIČNI DIO

3.1. Postupci kaljenja alata

U teorijskom dijelu opisane su osnovne značajke kaljenja alatnih čelika koje ukazuju da pri određivanju tehnoloških parametara procesa kaljenja konkretnih alata, za postizanje potrebnih promjena mikrostrukture, treba uzeti u obzir i posebne zahtjeve i ograničenja pri ugrijavanju i ohlađivanju. Kod ugrijavanja je potrebno uzeti u obzir relativno malu toplinsku vodljivost alatnih čelika za topli rad i opasnost djelovanja toplinskih napetosti. Pri ohlađivanju (gašenju) treba smanjiti mogućnost izlučivanja karbida, a u drugoj fazi, kod nastanka martenzita, smanjiti toplinske napetosti. Na temelju praktičnih iskustava, uzimajući u obzir svojstva čelika i principe prijenosa topline, razvijaju se novi i unaprijeđuju postojeći tehnološki postupci kaljenja alata. To primjenjuju posebice velike kompanije uvodeći vlastite propise – „specifikacije“ koje moraju primjenjivati vlastite tvornice kao i njihovi kooperanti. U nastavku će se opisati osnovne značajke dostupnih specifikacija velikih poznatih svjetskih tvrtki za kaljenje alata za topli rad od tipiziranog alatnog čelika.

3.2. Preporuke tvrtke *GENERAL MOTORS* [12]

U koncernu *General Motors Powertrain* razrađene su specifikacije (GM PT 9999-1) za posebnu kvalitetu toplinske obradbe alatnog čelika za topli rad H13 premijum. Ove preporuke također propisuju opremu za toplinsku obradbu koja ima mogućnost praćenja temperature jezgre i temperature površine pri ugrijavanju i pri gašenju radnog komada.

Sastav H13 premium alatnog čelika za topli rad prema *General Motors Powertrain Specification* (GM PT 9999-1) prikazan je u tablici 3.1. Oznaka H13 je prema normi (AISI), a „premium“ se odnosi na posebnu kvalitetu postignutu dvostrukim pretaljivanjem pod troskom ESR (electro-slag remelting = električno pretaljivanje pod troskom).

Tablica 3.1. Sastav H13 premijum čelika prema GM PT 9999-1[12]

sastav, %							
C	Mn	Si	S	Cr	V	Mo	P
0.37-0.42	0.20-0.50	0.80-1.2	0.003max	5-5.5	0.8-1.2	1.2-1.75	0.15max

3.2.1. Oprema

Za ispunjenje uvjeta ovih specifikacija potrebna je sljedeća oprema:

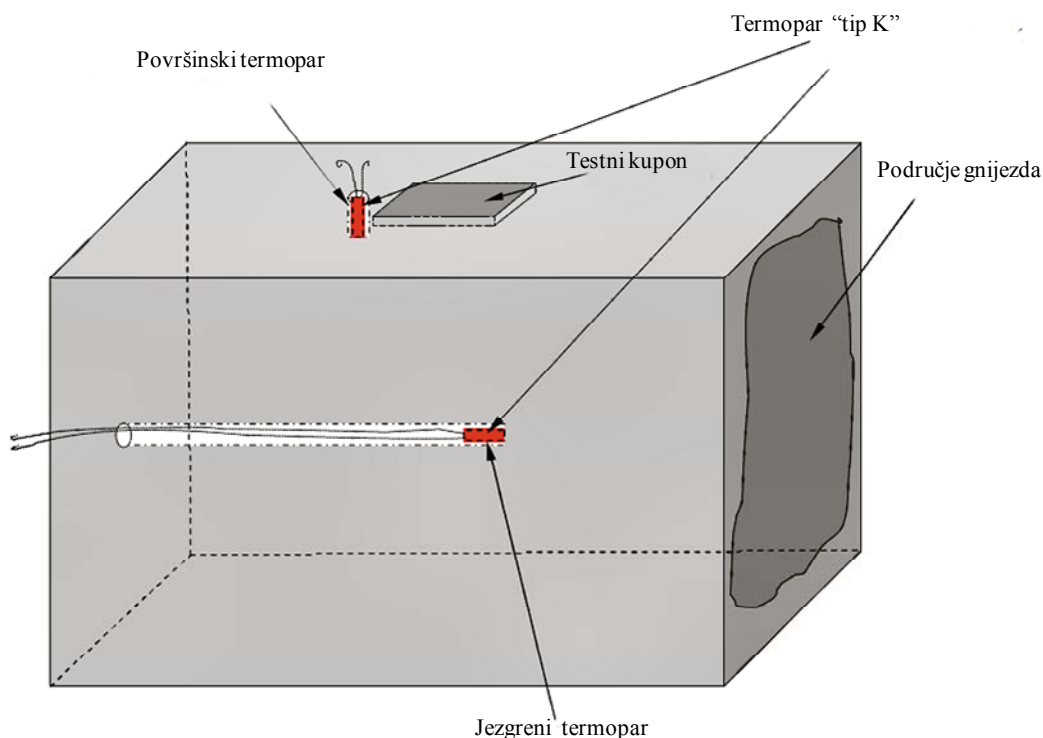
- a) Vakuumska peć sa sposobnošću punjenja dušikom na tlak od 10 bara. Kapacitet peći mora biti dovoljan da se postigne režim gašenja od 39°C (70°F) po minuti (mjereno površinskim termoparom smještenim na centru ledne površine komada na dubini od 5/8“) pod punim opterećenjem. To će zahtijevati peć dovoljne veličine za primanje velikih radnih komada uz adekvatnu cirkulaciju plina u cilju smanjena mogućnosti pojave deformacija na bloku.
- b) Programibilni kontroler za peć sposoban za simultano praćenje minimalno šest termoparova s mogućnošću programiranja specifičnog režima gašenja sa izotermičkim držanjem. Promjer termopara mora biti 1/8“ da odgovara veličini i promjeru rupe određene za umetanje termoparova.

- c) Uređaj za digitalno pohranjivanje podataka sposoban za praćenje i snimanje cijelog ciklusa toplinske obradbe, uključujući ugrijavanje (austenitizaciju), gašenje i višestruko popuštanje. Dobivene numeričke podatke potrebno je pohraniti i utvrditi proces toplinske obradbe. Ti podaci se moraju prebaciti u proračunsku tablicu u Excel i biti na raspolaganju proizvođaču čelika (*Die Caster's*) i proizvođaču alata. Grafički prikaz ovih podataka može biti samo nadopuna, ali ne i zamjena za njih.
- d) Peć mora imati certifikat i biti održavana u skladu s MIL-H-6875 specifikacijom. Termoparovi i kontroler moraju biti kalibrirani po NBS (NIST) standardu 90 dana prije početka upotrebe na GM materijalima.

3.2.2. Toplinska obradba prema GM PT 9999-1

Svi procesi toplinske obradbe su u skladu sa sljedećim zahtjevima. Bilo kakva odstupanja se moraju zatražiti u pisanom obliku i biti odobrena od strane General Motors Powertrain. Odstupanja se rijetko odobravaju.

Potrebno je umetnuti dva termopara (slika 3.1), jedan na mjerenje temperature površine, a drugi za mjerenje temperature jezgre. Rupe za umetanje termoparova su određene i postavljene od strane proizvođača alata, a nalaze se na središtu stražnje strane, promjera 1/8" i dubine 5/8". Ova lokacija je obavezna osim ako su uvjeti takvi da se proces toplinske obradbe neće pravilno izvršiti ukoliko obradak nije položen na stražnju površinu. Tada je izvršitelj toplinske obradbe odgovoran za pravilno postavljanje rupa za termoparove. Korištenje dodjeljenih lokacija za umetanje termoparova je obavezno. Ako izvršitelj toplinske obradbe primi dostavljeni alat koji nema pravilno izbušene rupe na sebi, obradak se treba vratiti proizvođaču ili će izvođač toplinske obradbe sam izbušiti propisane rupe. Odgovornost proizvođača alata i izvođača toplinske obradbe da odrede pravilna mjesta za postavljanje rupa za termoparove. Ukoliko za to nisu sposobni to može biti razlog odbijanja. Jezgreni termopar je smješten u središnjem djelu unutrašnjosti obratka. Ukoliko je više obradaka koji se zajedno griju (moraju biti sličnih dimenzija) termoparovi se postavljaju na najvećeg od njih. Testni blok prikazan na slici 3.1 ima dimenzije 16x16"x16" (406mm x 406mm x 406mm).



Slika 3.1. Lokacije za umetanje termoparova na testni blok dimenzija (16"x16"x16") [12]

3.2.3. Žarenje za redukciju napetosti

Žarenje za redukciju napetosti se izvodi u cilju smanjenja rizika deformacija pri kaljenju. Najčešće se izvodi nakon grube strojne obrade te u slučaju alata kompleksnih oblika. Grijanje do temperature 593-637°C (1100-1150°F) te nakon potpunog progrijavanja tj. kada jezgra dostigne temperaturu 593-637°C (1100-1150°F) držimo 60 minuta. Režim grijanja ne smije prelaziti 222°C (400°F) po satu. Hlađenje do temperature 427°C (800°F) režimom koji ne prelazi 111°C (200°F) po satu, a zatim hlađenje na zraku do temperature ispod 65°C (150°F). Vrijeme, temperatura i režimi mjere se jezgrenim termoparom.

3.2.4. Austenitizacija

Obradak se postavlja u hladnu peć i zatim grije do $593-649^{\circ}\text{C}$ ($1100-1200^{\circ}\text{F}$) uz režim grijanja 222°C (400°F) po satu mjereno termoparom u jezgri, zatim držanje dok je razlika temperatura između površine i jezgre veća od 111°C (200°F) ($\vartheta_{\text{pov}} - \vartheta_{\text{jez}} > 111^{\circ}\text{C}$ (200°F)). Nastavljanje grijanja do temperature $635 \pm 14^{\circ}\text{C}$ ($1775 \pm 25^{\circ}\text{F}$) režimom od 166.5°C (300°F) po satu mjereno jezgrenim termoparom, zatim držanje dok $\vartheta_{\text{pov}} - \vartheta_{\text{jez}} \leq 55.5^{\circ}\text{C}$ (100°F), nakon toga držimo na toj temperaturi još 30 minuta te na kraju gašenje što je brže moguće tj. dozvoljeno.

3.2.5. Gašenje

Radni komadi se gase u peći pri tlaku od 9 bara ili više. U svakom slučaju tlak u peći pri gašenju treba biti što je viši moguć bez rizika da će se alatu promijeniti mehanička svojstva.

Gašenje sa prekidima I. metoda

Gašenje u struji plina do $427 \pm 8^{\circ}\text{C}$ ($800 \pm 15^{\circ}\text{F}$) mjereno termoparom na površini, zatim prekid gašenja ako treba reducirati temperaturnu razliku između površine i jezgre. Ako je razlika $\vartheta_{\text{pov}} - \vartheta_{\text{jez}}$ manja od 111°C (200°F) kada temperatura površine dosegne 427°C (800°F), tada prekidanje nije potrebno i gašenje se ne smije prekidati. Čekati sa prekidom dok:

- temperaturna razlika između površine i jezgre ne bude manja od 111°C (200°F),
- temperatura površine dostigne 399°C (750°F),
- ne prođe 5 minuta od početka gašenja.

Gašenje se prekida kada se ispuni jedan od navedena tri uvjeta, nije bitno koji je prvi. Dodatna toplina se neće dovoditi grijanom elementu dok traje prekid. Ako temperatura površine naraste iznad 440°C (825°F) tijekom prekida, hlađenje treba nastaviti za održavanje

temperature površine između 413°C (775°F) i 440°C (825°F) tijekom prekida. Režim gašenja će biti minimalno 39°C (70°F) po minuti sve do 555°C (1000°F), to će trajati manje od 13 minuta sa temperature austenitizacije.

Tlak plin za gašenje u peći nakon prekida će biti isti kao i prije prekida. Nastavak gašenja do temperature 149°C (300°F) mjereno termoparom u jezgri, nakon toga vađenje komada iz peći i daljnje hlađenje na zraku dok temperatura površine ne dostigne temperaturu 49°C (120°F). Kada su gornje pretpostavke zadovoljene trajanje prekida mora biti minimalno i prekid se mora izbjegavati ukoliko nije potreban. Otvaranje vrata peći za vrijeme gašenja je strogo zabranjeno.

Gašenje sa prekidima II. metoda

Izvršitelj toplinske obradbe svojom odlukom na temelju dobrih tehničkih podataka može izostaviti držanje na 427°C (800°F) tijekom procesa gašenja i jednostavno gasiti do 149°C (300°F) mjereno termoparom u jezgri sa režimom gašenja ne ispod 39°C (70°F) po minuti (mjereno termoparom na površini). Tlak u peći za vrijeme gašenja od 9 bara može se smanjiti kada temperatura radnog komada padne ispod 427°C (800°F) dosljedno snazi i zahtjevima peći. Gašenje mora biti što je brže moguće.

3.2.6. Popuštanje

Nakon hlađenja površine radnog komada do 49°C (120°F), odmah se provodi proces popuštanja na temperaturi 593-637°C (1000-1050°F), držanje na temperaturi popuštanja jedan sat po inču debljine, a minimalno dva sata. Zatim hlađenje do sobne temperature na zraku i mjerenje tvrdoće.

Ponoviti popuštanje na temperaturi 551-616°C (1024-1140°F) za postizanje zahtjevnog tvrdoće 42-44HRC. Ukoliko postoje određena pitanja u vezi temperatura popuštanja treba kontaktirati dobavljača alata. Držati na temperaturi popuštanja jedan sat po inču debljine, a minimalno dva sata. Hladiti na zraku do sobne temperature na zraku i izmjeriti tvrdoću. Ukoliko nije postignuta željena tvrdoća još jednom provodimo postupak popuštanja na odgovarajućoj temperaturi. Držati jedan sat po inču debljine, a minimalno dva sata.[8]

3.3. Preporuke tvrtke *FORD* [13]

Preporuke (specifikacije) *Ford Advanced Manufacturing Technology Development* (AMTD-DC 2010) odnose se na toplinsku obradbu alatnog čelika za topli rad H13 premium. Istraživanje i razvoj aktivnosti usmjerenih na vijek trajanja alata su ustanovili da proces toplinske obradbe ima značajan učinak na vijek trajanja.

3.3.1. Vakuumska peć ili gašenje u fluidu

Ako se za grijanje koristi vakuumska peć, tada ta peć mora imati sposobnost najbržeg režima gašenja za veličinu umetnutog obratka. Ukoliko gasimo vodom ili uljem, moramo biti sposobni prekinuti gašenje za održavanje maksimalne temperaturne razlike između površine i jezgre od 111°C (200°F). U slučaju gašenja u ulju ili vodi, preporučeno je da proces bude razvijen kroz eksperimentalne metode u svrhu minimalizacije deformacija ili prevencije protiv pukotina.

3.3.2. Lokacije rupa za umetanje termoparova

Termoparovi će biti postavljeni na radni komad prema NADCA 207-97 specifikaciji. Minimalno dva termopara treba postaviti na radni komad za omogućavanje praćenja i snimanja podataka tj. temperature površine ϑ_{pov} i temperature jezgre ϑ_{jez} . Lokacija rupe za umetanje površinskog termopara približno je centrirana na leđnoj površini obratka, promjer rupe je 1/8" (3.18mm), a dubina 5/8" (15.88mm). Ova lokacija je obavezna, osim ako su uvjeti takvi da se komad neće pravilno ugrijavati ako nije položen na leđnu površinu. U tom slučaju specifikator toplinske obradbe je dužan odrediti nove prikladne lokacije rupa koje će izbušiti proizvođač alata. Jezgreni termopar je smješten u centru samog komada. Ukoliko grijemo više komada zajedno (moraju biti sličnih dimenzija), tada se termoparovi postavljaju na najvećeg od njih.

3.3.3. Žarenje za redukciju napetosti

Žarenje za redukciju napetosti se izvodi u cilju smanjenja rizika od deformacija pri kaljenju. Najčešće se izvodi nakon grube strojne obradbe te u slučaju kompliciranih alata. Obradak se grije na temperaturu 593-637°C (1100-1150°F). Nakon što se obradak u potpunosti progrije tj. kad temperatura jezgre dosegne 593-637°C (1100-1150°F) slijedi držanje na toj temperaturi u trajanju od 60min. Grije se režimom koji ne prelazi 222°C (400°F) po satu. Zatim se obradak hladi do temperature 427°C (800°F) režimom od približno 93°C (200°F) po satu. Nakon toga se hladi na zraku do temperature 65.5°C (150°F). Vrijeme, temperature i režimi su određeni mjerenjem jezgrenim termoparom.

3.3.4. Austenitizacija

Umetanje površinskog i jezgrenog termopara na radni komad provodi se prema specifikaciji NADCA 207-97 (kako je prije navedeno u tekstu). Termopar na površini mora biti umetnut u rupu koja je unaprijed određena. Ukoliko grijemo više komada zajedno (moraju biti sličnih dimenzija) tada termoparove postavljamo na najvećeg od njih.

Grijanje radnog komada na temperaturu 593...649°C (1000...1200°F) režimom ne većim od 222°C (400°F) po satu, mjereno termoparom na površini radnog komada. Nastavak grijanja do temperature $857 \pm 14^{\circ}\text{C}$ ($1575 \pm 25^{\circ}\text{F}$) režimom ne većim od 149°C (300°F) po satu, mjereno termoparom na površini radnog komada, zatim držanje na toj temperaturi dok se ne izjednače temperatura površine i jezgre. Nakon izjednačenja temperatura površine i jezgre nastaviti grijanje radnog komada na temperaturu austenitizacije $1030 \pm 5.5^{\circ}\text{C}$ ($1886 \pm 10^{\circ}\text{F}$) režimom ne većim od 167°C (300°F) po satu, mjereno termoparom na površini radnog komada. Nakon uspostavljanja temperaturne razlike $\vartheta_{\text{pov}} - \vartheta_{\text{jez}} < 13.9^{\circ}\text{C}$ (25°F) držati 30 minuta ili maksimalno 90 minuta nakon $\vartheta_{\text{a}} = \vartheta_{\text{pov}}$.

3.3.5. Gašenje

Svi radni komadi će se gasiti ili u vakumskoj peći ili u fluidu za gašenje. U svakom slučaju, režim gašenja mora biti što je moguće brži bez rizika na stvaranje deformacija i pukotina radnog komada. Za određivanje najbržeg mogućeg režima gašenja biti će potrebno provesti određena testiranja gašenja na uzorcima sličnih dimenzija kao što je radni komad. Budući da je režim gašenja dosta brz, trebat će izvesti prekide ukoliko razlika temperatura između površine i jezgre prijeđe zadane okvire.

Proces gašenja će biti nadziran i kontroliran prema slijedećim pretpostavkama. Sa temperature austenitizacije, gasimo radni komad na temperaturu $427 \pm 8.3^{\circ}\text{C}$ ($800 \pm 15^{\circ}\text{F}$), mjereno površinskim termoparom. Ukoliko temperaturna razlika između površine i jezgre izlazi iz zadanih okvira potrebno je prekinuti gašenje kako bi se ta razlika smanjila. Ako je razlika $\vartheta_{\text{pov}} - \vartheta_{\text{jez}}$ manja od 111°C (200°F), kada je temperatura površine 427°C (800°F) prekid nije potreban, gašenje se nastavlja i ne smije se prekidati.

Čekati sa prekidom dok:

- razlika između površine i jezgre ne bude manja od 111°C (200°F),
- temperatura površine dosegne 399°C (750°F),
- ne prođe 15 min od početka gašenja.

Za vrijeme prekida obratku se ne smije dovoditi toplinske energija. Ukoliko temperatura površine tijekom prekida poraste na 440°C (825°F), treba provesti hlađenje da održimo temperaturu površine između 413°C (775°F) i 440°C (825°F) tijekom prekida. Za veće obratke režim gašenja će biti minimalno 28°C (50°F) po minuti do temperature 538°C (1000°F). Vrijeme gašenja do temperature 538°C (1000°F) sa temperature austenitizacije biti će kraće od 18 minuta. Tlak plina za gašenje u peći nakon prekida će biti isti kao i prije prekida. Gašenje se nastavlja (kad su navedeni uvjeti zadovoljeni) do temperature 149°C (300°F). Trajanje prekida gašenja mora biti minimalno potrebno i prekidi se trebaju izbjegavati ukoliko nisu nužni. Nakon gašenja na temperaturu 149°C (300°F) komad se vadi iz peći i nastavlja hladiti na zraku do temperature 65°C (150°F). Otvaranje vrata za vrijeme gašenja je strogo zabranjeno.

3.3.6. Popuštanje

Nakon hlađenja na temperaturu 65°C (150°F) odmah treba izvršiti proces popuštanja na temperaturi 538-615°C (1100-1140°F). Na svaki inch debljine obratka držati po jedan sat, dva sata minimalno. Nakon držanja na temperaturi popuštanja slijedi hlađenje do sobne temperature i mjerenje tvrdoće.

Ponovno popuštanje na temperaturi 552-615°C (1025-1140°F) u cilju postizanja zahtjevnije tvrdoće od 44-46 HRc, osim ako nije drugačije navedeno. Ukoliko postoje određena pitanja u vezi temperatura popuštanja treba kontaktirati dobavljača alata. Držanje na temperaturi popuštanja po jedan sat za svaki inch debljine obratka, dva sata minimalno. Nakon držanja na temperaturi popuštanja hlađenje do sobne temperature i mjeriti tvrdoću. Ukoliko željena tvrdoća nije postignuta, postupak popuštanja treba provesti još jednom. Nakon trećeg popuštanja mjerimo tvrdoću i zapisujemo kao krajnju.[9]

3.4. Preporuke tvrtke **BÖHLER** [14]

Ove preporuke se odnose na toplinsku obradbu alatnog čelika za topli rad W302 Superior (H13 premium). Sastav W302 superior alatnog čelika za topli rad prema specifikacijama *North American Die Casting Association* (NADCA) 207-97 prikazan je u tablici 3.2.

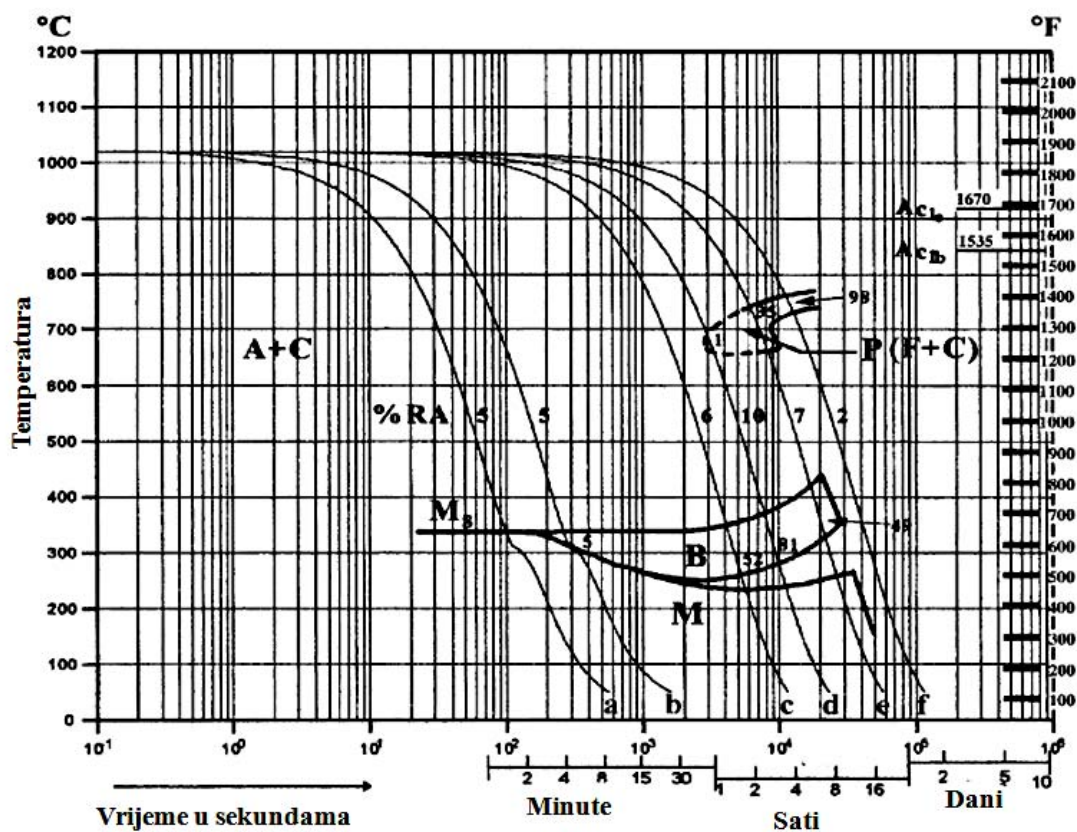
Tablica 3.2. Sastav čelika W302 superior [14]

sastav, %						
C	Mn	Si	S	Cr	V	Mo
0.39	0.40	1.10	≤0.003	5.20	0.95	1.40

Ove preporuke odgovaraju zahtjevima specifikacija *North American Die Casting Association* (NADCA) 207-97. Alatni čelik za topli rad W302 superior (H13 premium) stvoren je prema zahtjevima alata za topli rad. Toplinskom obradbom prema specifikaciji (NADCA) 207-97 postiže se izvanredan učinak prokaljenosti te poboljšanje otpornosti na toplinski umor, tj. otpornosti na površinske pukotine.

Termin „superior“ odnosi se na *Böhlerovu* metodu proizvodnje ESR (electro-slag remelting) za postizanje čelika kvalitete superiornih mehaničkih osobina.

Alatni čelik W302 Superior (H13 premium) pokazuje najbolje osobine na alatima: za lijevanje (jezgrenici, umetci, kalupne gravure), vruće kovanje, ekstrudiranje, matrice za plastično oblikovanje metala te razne druge komponente alata kod kojih se traži visoka kvaliteta obrađenosti površine i visoka žilavost. Na slici 3.2 prikazan je TTT dijagram alatnog čelika za topli rad W302 superior (H13 premium) sa ucrtanim krivuljama gašenja.



Slika 3.2. TTT dijagram alatnog čelika za topli rad W302 Superior [14]

Na TTT dijagramu prikazanom na slici 3.2 ucrtane krivulje gašenja označene su sa slovima od „a“ do „f“ te predstavljaju različite režime gašenja. Tablica 3.3 prikazuje postignutu tvrdoću u ovisnosti o režimu gašenja. Koeficijent prijenosa topline λ se odnosi na raspon temperatura od 1470-930°F (800°-500°C) izražen u sekundama $\times 10^{-2}$.

Tablica 3.3. Utjecaj brzine gašenja na postignutu tvrdoću [14]

Krivulja gašenja	λ	HV10
a	0.4	568
b	1.03	590
c	18	598
d	36	520
e	90	410
f	180	215

3.4.1. Žarenje

Grijanje u zaštitnoj atmosferi do temperature 850 °C (1560 °F). Zatim sporo hlađenje u peći režimom 10- 20°C/h (20-40 °F/h) do temperature 650°C (1200°F), nakon toga nastaviti hladiti na zraku. Maksimalna tvrdoća nakon žarenja treba biti 229 HB.

3.4.2. Žarenje za redukciju napetosti

Ovo žarenje provodi se nakon grube strojne obrade za redukciju zaostalih naprezanja. Grijanje u zaštitnoj atmosferi do temperature 650°C (1200°F) te držanje dva sata na toj temperaturi. Nakon držanja slijedi sporo hlađenje u peći do temperature 500°C (930°F) te dalje hlađenje na zraku.

3.4.3. Kaljenje

Zagrijavanje do temperature austenitizacije u zaštitnoj atmosferi uz tri predgrijavanja:

- prvo predgrijavanje na temperaturi 650°C (1200°F),
- drugo predgrijavanje na temperaturi 840°C (1550°F),
- treće predgrijavanje na temperaturi 950°C (1740°F).

Nakon toga grijanje do temperature austenitizacije 1020-1050°C (1870-1920°F). Tablica 3.4 prikazuje vrijeme držanja ovisno o temperaturi austenitizacije te postignute tvrdoće nakon gašenja.

Tablica 3.4. Postignuta tvrdoća nakon gašenja sa temperature austenitizacije [14]

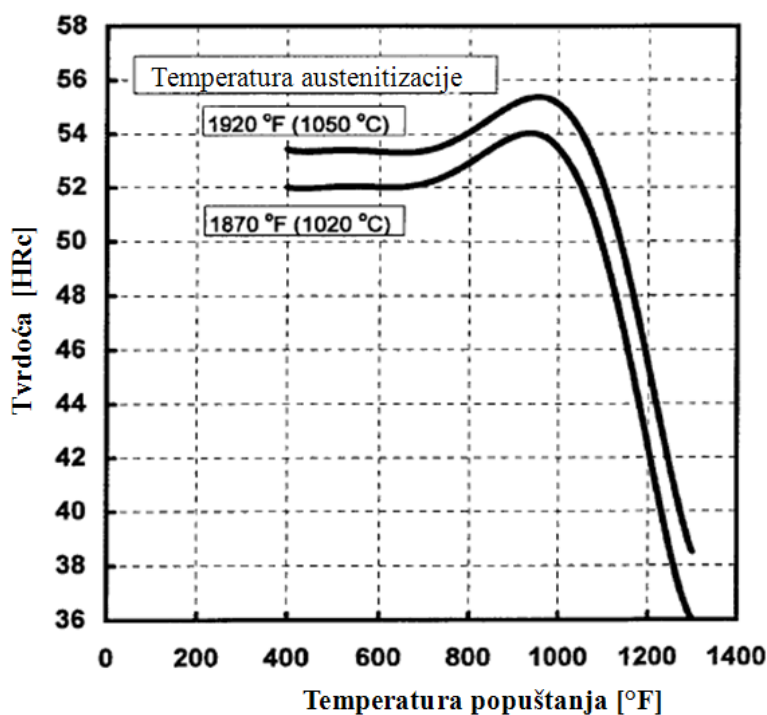
Temperatura	Vrijeme držanja	Tvrdoća nakon gašenja
1020°C (1870°F)	30min	53 ± 2 HRc
1050°C (1920°F)	15min	54 ± 2 HRc

Gašenje sa temperature austenitizacije u inernom plinu maksimalnom mogućom brzinom gašenja radi izbjegavanja neželjenih transformacijskih produkata. Kod velikih alata kompleksnog oblika, potrebno je vršiti gašenje sa prekidima.

Prekinuti gašenje na temperaturi 450-550°C (840-1020°F) te držati dok razlika temperatura između površine i jezgre alata bude manja od 111°C (200°F) ili držati maksimalno 30 minuta nakon što temperatura površine dosegne temperaturu 450-550°C (840-1020°F), ovisno koji od ova dva uvjeta se prvo ispuni. Nakon toga nastaviti gašenje do temperature 65°C (150°F).

3.4.4. Popuštanje

Izabrati temperaturu popuštanja sa grafa prikazanog na slici 3.3 temeljem zahtijeva na tvrdoću. Minimalno provesti dva popuštanja sa sporim hlađenjem. Za optimalne karakteristike izbjegavati popuštanje na temperaturama od 425 do 525°C (800 - 980°F). Vrijeme držanja na temperaturi popuštanja je po jedan sat na svaki inch debljine, minimalno dva sata.



Slika 3.3. Tvrdoća popuštanja u odnosu na temperaturu popuštanja [14]

3.5. Preporuke tvrtke *BODYCOTE* [15]

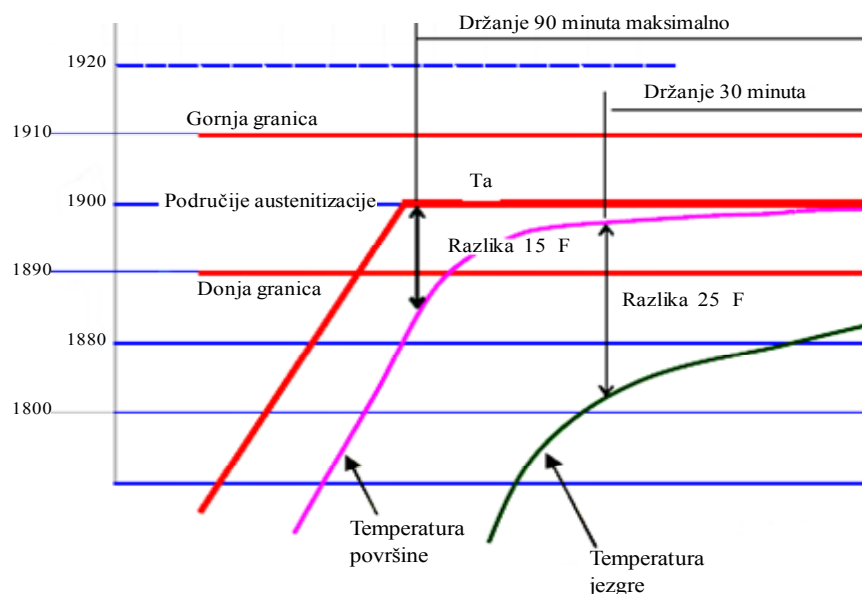
Ove preporuke se odnose na posebnu kvalitetu toplinske obradbe tipiziranog alatnog čelika za topli rad H13 premium. U proteklih deset godina u par navrata objavljene su najnovije korigirane preporuke o tijeku grijanja uz predgrijavanja i završne austenitizacije, a posebice su korigirani uvjeti gašenja jer su provedena pogonska ispitivanja pokazala da je brzina ohlađivanja pri kaljenju presudna za radni vijek alata, posebice onih koji su izloženi dinamičkim naprezanjima i toplinskom umoru (alati za topli rad). Ove preporuke se odnose uglavnom na visokolegirane alatne čelike za topli rad, ali identični principi vrijede i za ostale visokolegirane alatne čelike za rad u hladnom stanju i brzorezne čelike. Kod nelegiranih i niskolegiranih alatnog čelika, od kojih se u pravilu izrađuju alati manjih dimenzija, toplinska obradba je uglavnom jednostavnija te se u ovim preporukama ne obuhvaća. Preporuke tvrtke *Bodycote* za posebnu kvalitetu toplinske obradbe alata za topli rad izrađenih od čelika H13 prikazane su na slici 3.4.

BODYCOTE CENTRAL EUROPEAN GROUP	
"Special Quality" Heat Treating: 2003	
<u>Primary Issues:</u>	<u>Preheating:</u>
•Vacuum furnace	•Step heating Room Temp to
•Hardening temp	650°C to 850°C to 1032°C
•Quench rate	
•Hardness: 44-48 HRC	<u>Austenitizing:</u>
<u>Equipment:</u>	• 1032°C ; soak 30 minutes if
•9 bar MINIMUM	Ts-Tc<25°F, 90 minutes max
•at least 45°C/minute cooling	<u>Quenching:</u>
<u>Thermocouples:</u>	•From 1032°C to 300°C as
•Dedicated surface hole (Ts)	rapidly as possible (Ts)
•Core thermocouple (Tc)	•at least 45°C/minute Q-rate
<u>Test Coupon:</u>	from 1032°C to 800°F
•2½"x 3½"x ½"; attached flush	•Interrupt only if absolutely
•Charpy Impact, Micro, Grate	necessary
	•Continue quench to <65°C

Slika 3.4. Preporuke tvrtke *Bodycote* za posebnu kvalitetu toplinske obradbe alatnog čelika za topli rad H13 premium [15]

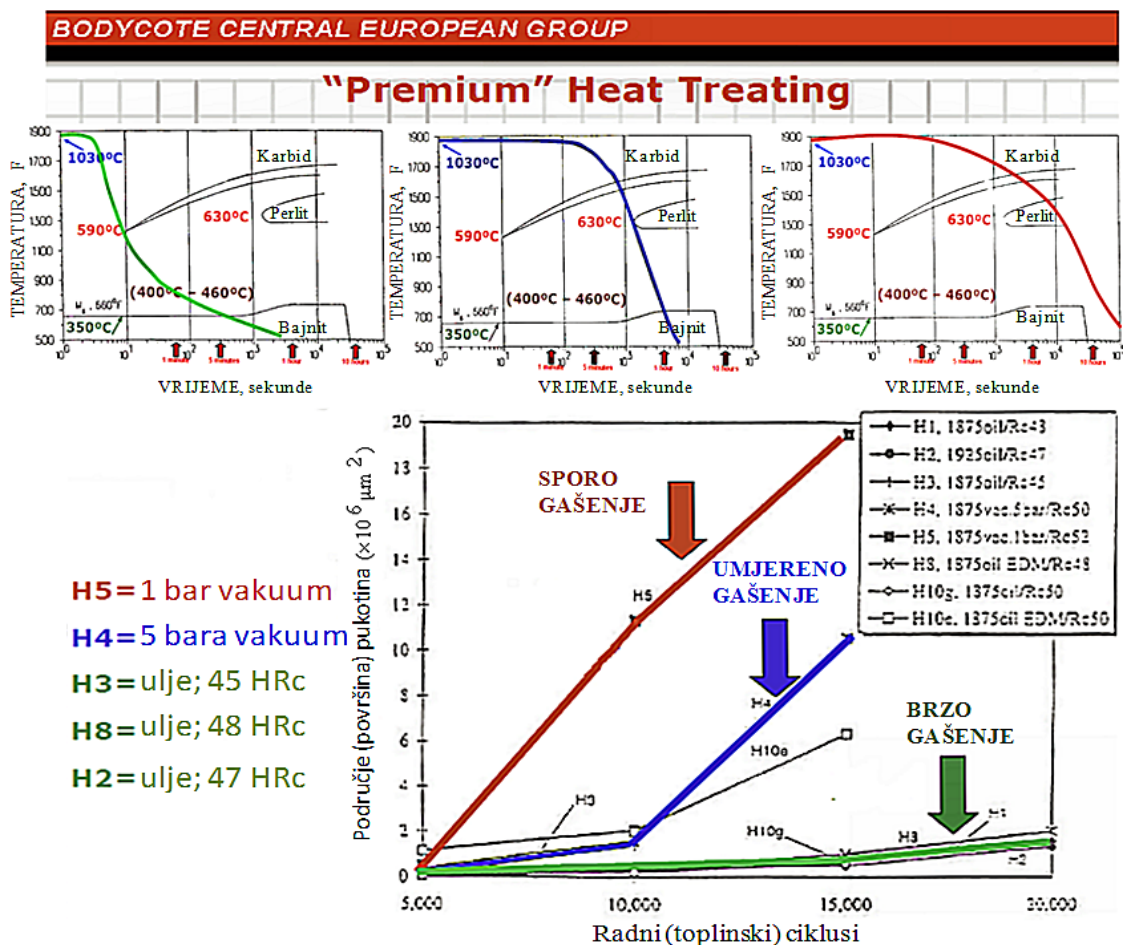
Cjeloviti tijek zagrijavanja i ohlađivanja prati se i regulira pomoću ugrađenih termoparova na površini i u jezgri testnog bloka normiranih dimenzija.

Nakon dva predgrijavanja provodi se austenitizacija (slika 3.5) u trajanju 30 minuta ako je razlika između temperature površine i jezgre manja od 14°C (25 °F), ili maksimalno 90 minuta kad temperatura površine dođe na 8°C (15°F) od temperature austenitizacije.



Slika 3.5. Princip grijanja na temperaturu austenitizacije te držanje na toj temperaturi prema preporukama tvrtke Bodycote [15]

Gašenje s temperature austenitizacije 1032°C do 300 °C treba se provesti čim brže, najmanje 45 °C/min mjereno termoparom na površini. Kod primjene vakuumskih peći tlak inertno plina pri gašenju mora biti minimalno 9 bara. Na prilagođenom ispitnom uzorku ispituje se žilavost i mikrostruktura. Sljedeći prikazi krivulja ohlađivanja u TTT dijagramima (slika 3.6) prikazuju utjecaj brzine gašenja na pojavu površinskih pukotina pri eksploataciji alata.



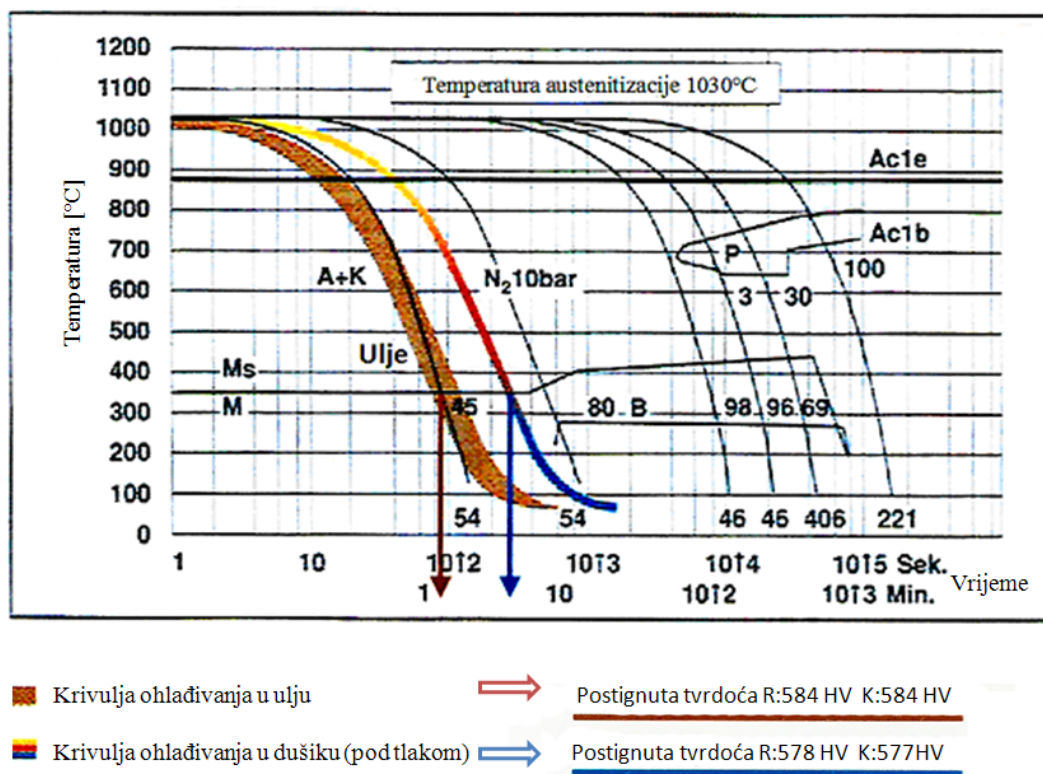
Slika 3.6. Utjecaj brzine gašenja na pojavu površinskih pukotina pri eksploataciji alata [15]

Kod nedovoljno brzog ohlađivanja pri kaljenju prvo se u području temperatura 800°C do 600°C izlučuju nadeutektoidni karbidi u obliku mreže po granicama austenitnog zrna. Formiranje karbida na granicama austenitnog zrna ima za posljedicu smanjenje koncentracije ugljika i kroma u području oko granice zrna. Tako osiromašeni austenit se pretvara u niskougljični primarni martenzit, tek nakon toga nepromijenjeni dio zrna austenita pretvara u „pravi“ martenzit. Kod još malih brzina ohlađivanja može se izvršiti pretvorba dijelom u bajnit i perlit, pri čemu se smanjuje žilavost, ali i tvrdoća kaljenja. Kod visokolegiranih alatnih čelika formirana prokaljivost je vrlo visoka i sa stajališta postizanja zahtijevane tvrdoće moguće je i kaljenje „na zraku“, što se često može naći i u preporukama proizvođača čelika.

3.6. Usporedbe gašenja u ulju i inertnom plinu

Kada se rezultat kaljenja vrednuje samo prema postignutoj tvrdoći, što je čest slučaj u praksi, razlike se jedva i primjećuju, pogotovo kod mjerenja tvrdoće metodom Rokwell C, dok se kod mjerenja metodom Vickers primjećuje samo mala razlika, što pokazuje sljedeći primjer.

Primjer na slici 3.7 pokazuje da je trajanje ohlađivanja čeličnog uzorka promjera 64 mm do temperature Ms dušikom pri tlaku 10 bara oko 5 minuta, a pri ohlađivanju u ulju samo 1 minutu. U oba slučaja postiže se tvrdoća 54 HRC.

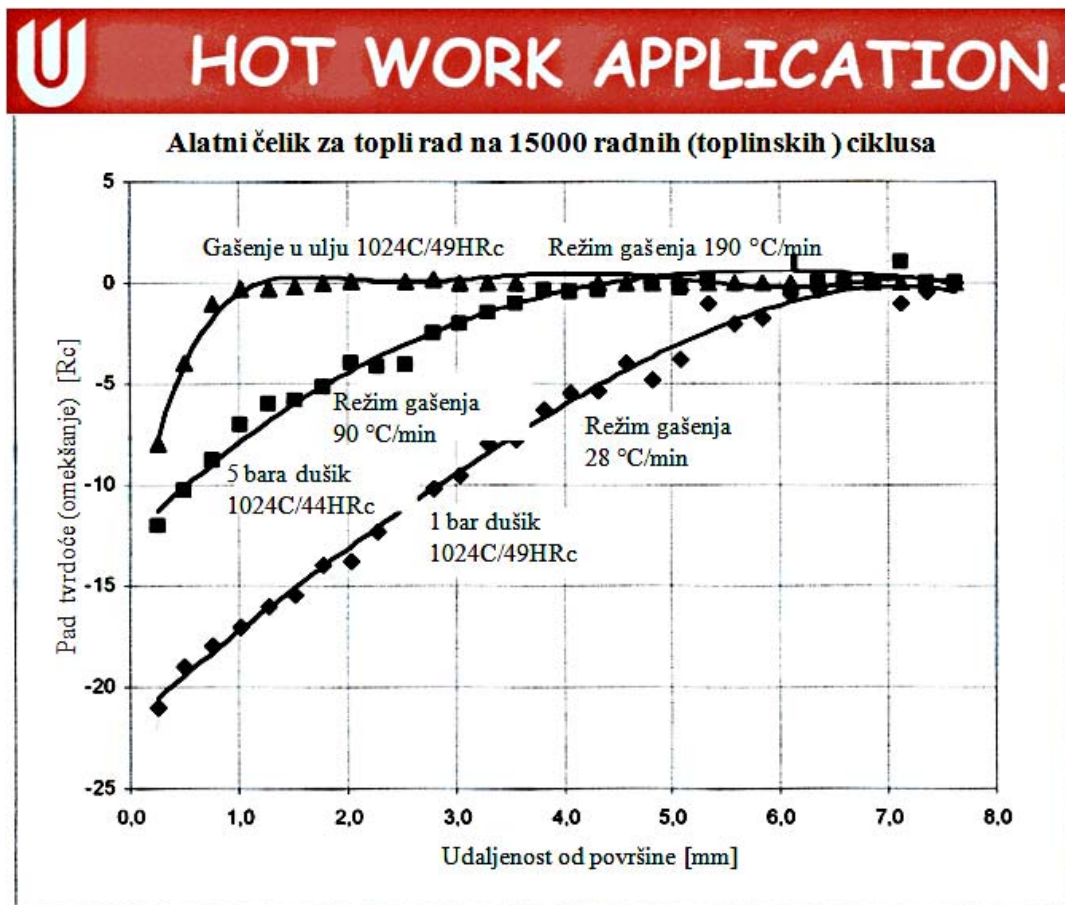


Slika 3.7. Usporedba krivulja ohlađivanja kod kaljenja dušikom pod tlakom i u ulju s rezultatima postignutih tvrdoća [16]

Mreža krhkih karbida po granicama zrna znatno utječe na smanjenje otpornosti prema dinamičkim naprezanima i toplinskom umoru. Niskouglični niskolegirani primarni martnezit ima smanjenu otpornost prema popuštanju pa kod eksploatacije alata pri povišenim temperaturama (alati za lijevanje i alati za kovanje) dolazi do omekšanja površinskog sloja

čelika, a time i do smanjenja tlačnih napetosti što također doprinosi smanjenju dinamičkih svojstava alata.

Rezultati mjerenja tvrdoće nakon eksploatacije pri povišenoj temperaturi pokazuju da je smanjenje tvrdoće čelika kaljenog u ulju znatno manje od onog kaljenog plinom pod visokim tlakom što se vidi na slici 3.8.

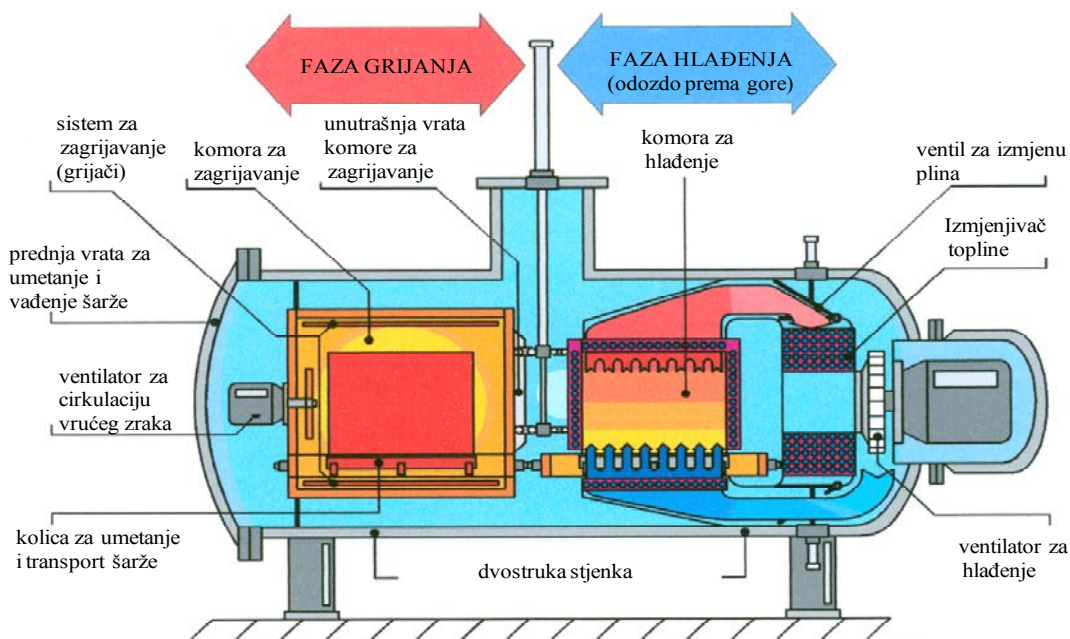


Slika 3.8. Omekšanje površinskog sloja alata za topli rad u eksploataciji, ovisno o brzini gašenja [17]

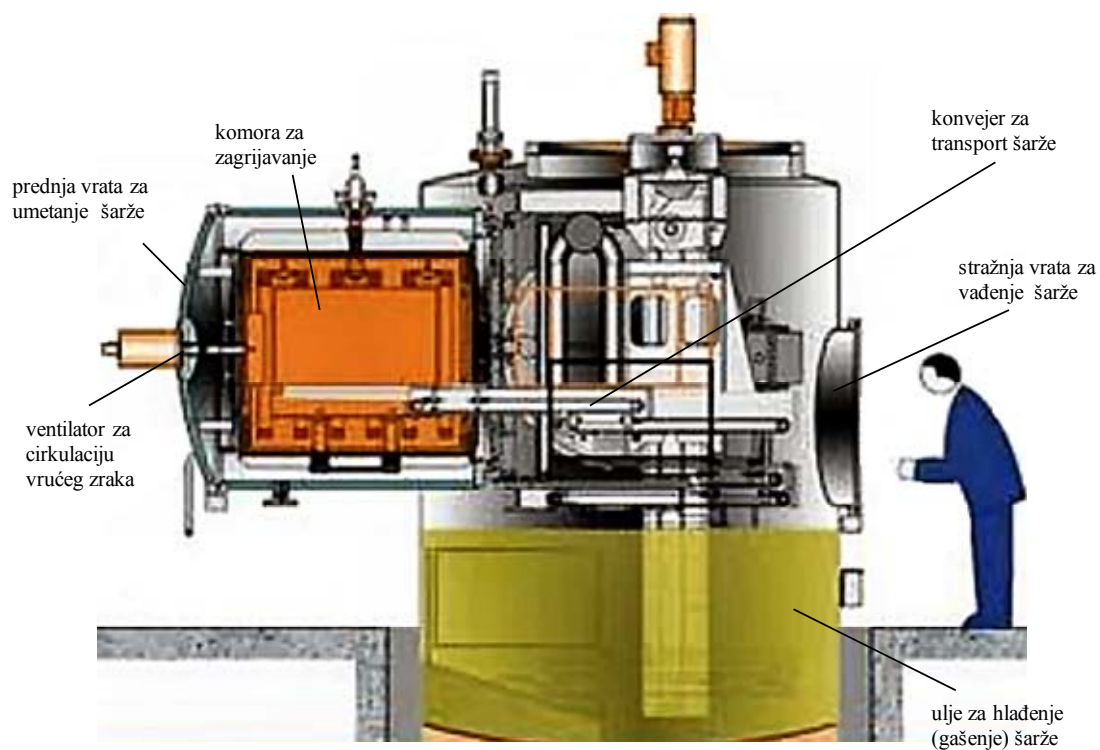
Velika brzina ohlađivanja u prvoj fazi gašenja potrebna je radi smanjenja mogućnosti izlučivanja karbidne mreže, ali bi mogla biti štetna u drugoj fazi gašenja kod pretvorbe austenita u martenzit. Tada bi zbog istovremene pojave visokih toplinskih naprezanja i strukturnih napetosti mogle nastupiti velike deformacije i opasnosti pucanja alata. Zato se u drugoj fazi gašenja brzina ohlađivanja znatno smanji, često i sa simuliranjem izotermičkog zastoja u tijeku gašenja.

Kako je brzina ohlađivanja kritična etapa kaljenja alata, razvoj opreme za kaljenje alata usmjeren je na povećanje brzine ohlađivanja. Budući da se vakuumske peći najviše primjenjuju za kaljenje alata radi zadržavanja čiste metalne površine pri kaljenju u zatvorenom sustavu, povećanje brzine ohlađivanja ostvaruje se povećanjem intenzivnosti ohlađivanja plinom (povećanja tlaka i cirkulacije plina te izbor plina koji nudi bolji prijenos topline: helija, vodika). U usporedbi s dušikom, helij (He) nudi veći koeficijent prijenosa topline a i manju potrebnu snagu rashladne turbine zbog manje gustoće, ali je zbog visoke cijene helija nužna primjena štednog zatvorenog rashladnog sustava. Vodik H_2 nudi još veći koeficijent prijenosa topline i još manju potrebnu snagu turbine, ali je osim potrebe zatvorenog rashladnog sustava potrebno uključiti i dodatne mjere sigurnosti vezane uz eksplozivnost vodika. Sve to značajno povećava investicijske troškove pogona.

Drugi smjer razvoja vakuumskih peći je prigradnja zatvorenog bazena za kaljenje u ulju, koje daje osjetno veću brzinu ohlađivanja. Međutim, zbog mogućeg otparavanja ulja u vakuumu, potrebna je primjena samo primjerenih ulja za kaljenje. Na slici 3.9 i 3.10 pokazani su principi suvremenih vakuumskih peći za povećanje intenzivnosti gašenja u ulju i plinu.



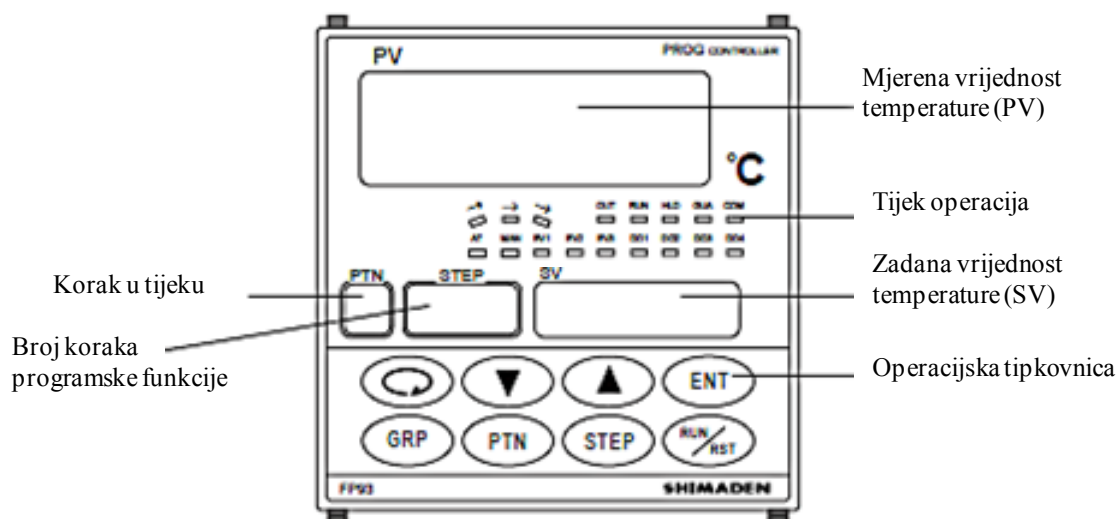
Slika 3.9. Vakuumska peć *Schmetz*, system 2plus za povećanje intenzivnosti gašenja s odvojenim intenzivnim ohlađivanjem plinom [18]



Slika 3.10. Vakuumska peč BMI P16_TH, za povečanje intenzivnosti gašenja s odvojenim intenzivnim ohlajevanjem u ulju [19]

3.7. Programski kontroler tvrtke *Shimaden* serije FP93 [20]

Programski kontroler japanske tvrtke *Shimaden* serije FP93 je uređaj za vođenje i regulaciju temperature peći po unaprijed zadanom programu. Program upravljanja unosi se u programski kontroler FP93 na dva načina, ručno preko operacijskih tipki koje se nalaze na prednjoj strani ovog uređaja ili preko računala. Uređaj na prednjoj stani ima ekran na kojem se može pratiti tijek operacije programa toplinske obradbe te zadane i trenutne parametre temperature. FP93 podržava programiranje upravljanja temperaturom do 40 koraka. Slika 3.11 prikazuje zaslon programskog kontrolera FP93 sa operacijskim tipkama.



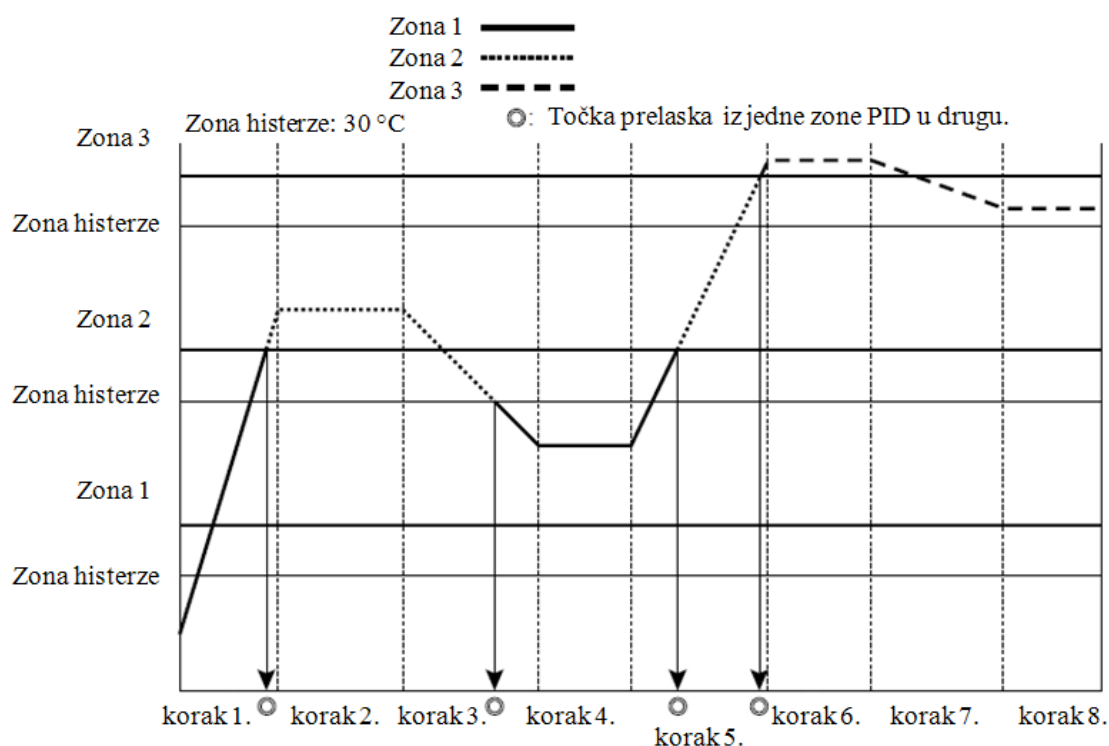
Slika 3.11. Shema zaslona programskog kontrolera FP93 [20]

Programiranje preko računala se izvodi u namjenskom programu *Micro Scan SCADA* (*Supervisory Control and Data Acquisition* = nadzor kontrola i zapisivanje podataka). Tvrtka *Shimaden* na svojoj internet stranici omogućava besplatno preuzimanje prilagođene verzije namjenskog programa *Micro Scan* za programiranje i upravljanje *Shimadenovih* programskih kontrolera te kontrolera za regulaciju. Programski kontroler FP93 podržava dvije vrste komunikacije s računalom, RS-232C i RS 485.

Standardni međusklop RS-232C služi za serijski prijenos podataka (bit po bit) te mu je maksimalna brzina prijenosa podataka 20 kbit/s a maksimalna udaljenost računala i uređaja ne smije biti veća od deset metara.

Standardni međusklop RS 485 služi za brži prijenos podataka i do 10 Mbit/s te na udaljenosti do 1200m. RS 485 služi i za prijenos podataka između više sugovornika.

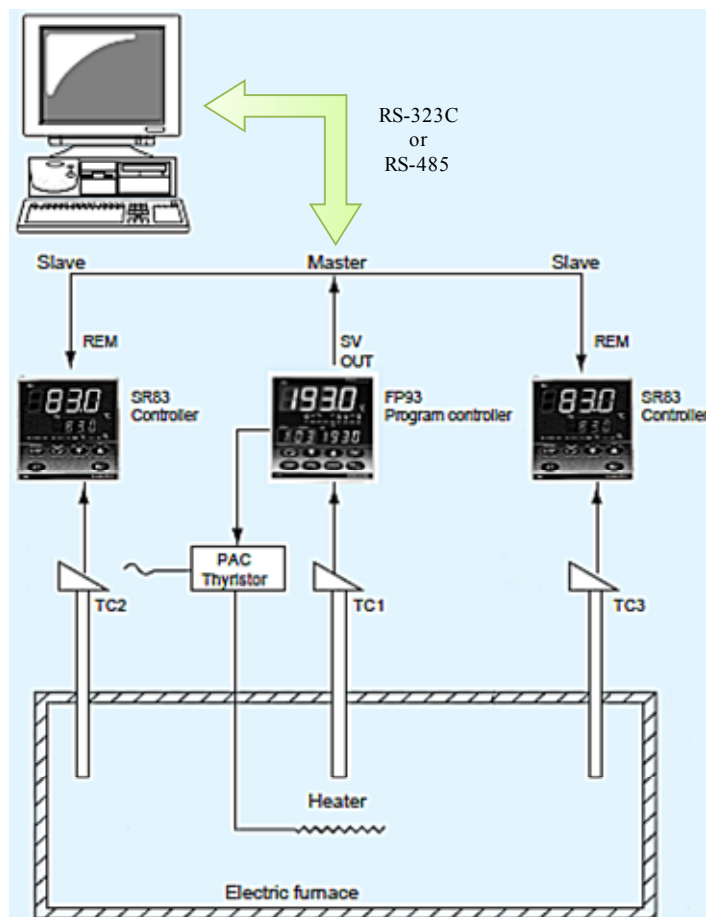
Područje upravljanja i regulacije temperature može se podijeliti u tri PID zone regulacije. Ova podjela se vrši radi bolje regulacije procesa. Razlog tomu je što se na višim temperaturama mijenjaju parametri procesa te iz tog razloga parametri PID namješteni za regulaciju procesa na nižim temperaturama ne bi kvalitetno regulirali proces na višim temperaturama. Ugađanje parametara PID regulatora u sve tri zone je automatsko (autotuning). Slika 3.12 prikazuje podjelu PID zona regulacije.



Slika 3.12. Grafički prikaz zona PID regulatora [20]

Uređaj FP93 može mjeriti samo jednu veličinu temperature tj. na njega se može spojiti samo jedan termopar. U slučaju kaljenja alatnog čelika za topli rad gdje se temperatura površine vodi u zavisnosti o temperature jezgre alata, na programski kontroler FP93 potrebno je spojiti Shimadenov kontroler serije SR83 koji mjeri temperaturu jezgre.

Slika 3.13 prikazuje način komunikacije programskog kontrolera FP93 sa dva kontrolera serije SR83 te komunikaciju sa računalom na kojemu se preko *Micro Scan* programa proces prati i zapisuje, a u svrhu vođenja i praćenja temperature preko više termoparova.

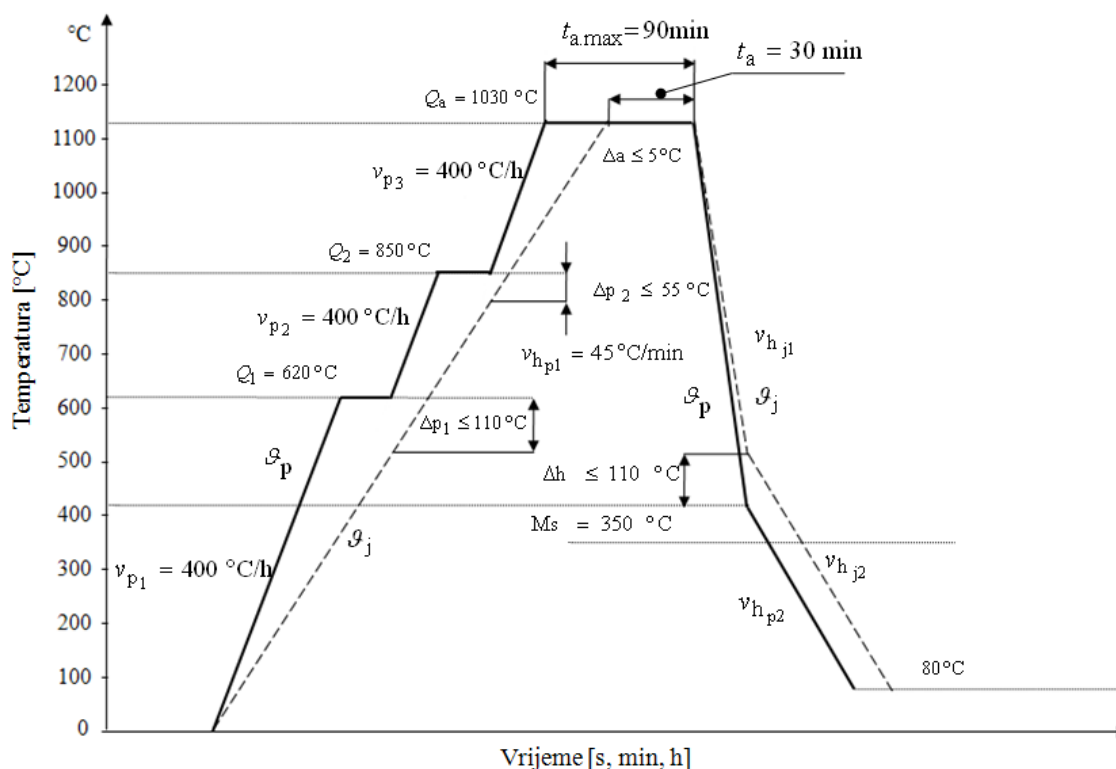


Slika 3.13. Način spajanja programskog kontrolera FP93 sa dva kontrolera SR83 u svrhu praćenja temperature sa tri termopara [20]

3.8. Simulacija procesa kaljenja u programu *Matlab*

Alatni čelici za topli rad imaju nisku toplinsku vodljivost zbog visokog udjela legirajućih elemenata. Iz tog razloga alati izrađeni od čelika za topli rad, kod procesa toplinske obradbe, trebaju vrlo precizno vođenje temperature radi izbjegavanja pojave visokih toplinskih napetosti između površine i jezgre.

Kaljenje ovakvih alata provodi se u pećima kod kojih se temperatura vodi po određenom programu. Prema preporukama tvrtke Bodycote i „specifikacijama“ GM PT 9999-1, zagrijavanje alata primjenjuje se uz dva pregrijavanja i to na temperaturama 620°C i 850°C radi smanjenja temperaturne razlike između površine i jezgre. Mjerenje temperature provodi se s dva ugrađena termopara i to jednim na površini a drugim u jezgri alata. Shematski tijek procesa kaljenja alatnog čelika za topli rad sa zadanim parametrima prikazuje slika 3.14.



Slika 3.14. Shematski tijek procesa kaljenja sa zadanim parametrima

Program upravljanja sastoji se od dva dijela, u prvom dijelu kod procesa grijanja alata program upravlja grijačima peći, dok u drugom dijelu kod procesa gašenja program upravlja elektromotorom za cirkulaciju ulja.

Upravljanje (vođenje) temperature peći provodi se prema sljedećim parametrima i kriterijima:

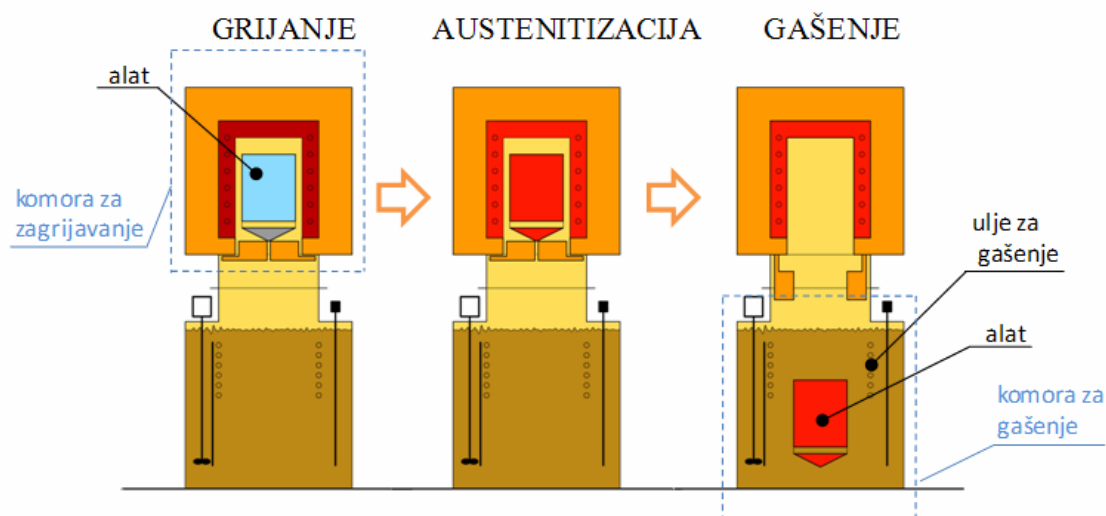
- start programa.
- Alat se grije na temperaturu 620°C, režimom od 400°C/h mjereno termoparom na površini alata.
- Držanje na temperaturi 620°C dok temperaturna razlika između površine i jezgre ne bude manja od 110°C.
- Nastavak grijanja na temperaturu 850°C režimom 400°C/h mjereno termoparom na površini alata.
- Držanje na temperaturi 850°C dok se ne uspostavi temperaturna razlika između površine i jezgre manja od 55°C.
- Nastavak grijanja na temperaturu austenitizacije 1030°C režimom 400°C/h mjereno termoparom na površini alata.
- Držanje na temperaturi austenitizacije maksimalno 90 min ili trideset minuta nakon što se uspostavi temperaturna razlika između površine i jezgre manja od 5°C.

Nakon držanja na temperaturi austenitizacije alat se spušta u kupku s uljem, gdje se provodi proces gašenja. Program upravlja elektromotorom prema sljedećim kriterijima i parametrima:

- program pokreće elektromotor za cirkulaciju ulja na maksimalnu brzinu, da bi režim gašenja bio približno 45°C/min mjereno površinskim termoparom.
- Kad temperatura površine padne na temperaturu 425°C program šalje signal za smanjenje brzine cirkulacije ulja radi održavanja temperaturne razlike između površine i jezgre manjom od 110°C.
- Gašenje se nastavlja do temperature 80°C.

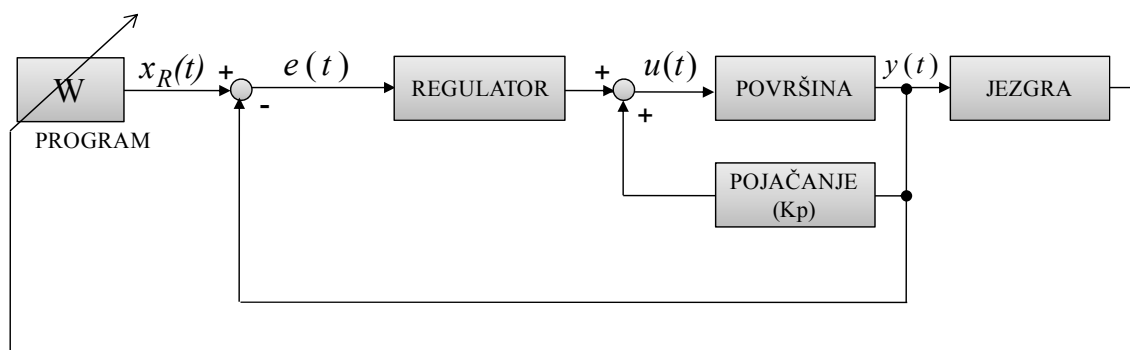
Primjer peći u kojoj se izvodi opisani proces kaljenja prikazan je na slici 3.16. Zagrijavanje radnog komada na temperaturu austenitizacije provodi se u komori za zagrijavanje. Nakon

držanja na temperaturi austenitizacije alat se gasi uronjavanjem u ulje koje cirkulira određenom brzinom.



Slika 3.15. Primjer peći za kaljenje alatnih čelika za topli rad [21]

Simulacija procesa kaljenja alatno čelika za topli rad napravljena je u programu *Matlab*. Slika 3.16 prikazuje shematski sistem vođenja preko povratne veze koja generira referentnu (vodeću) veličinu.



Slika 3.16. Shema upravljanja procesom kaljenja sa dva ugrađenja termopara preko povratne veze

$x_R(t)$ referentna (vodeća) veličina

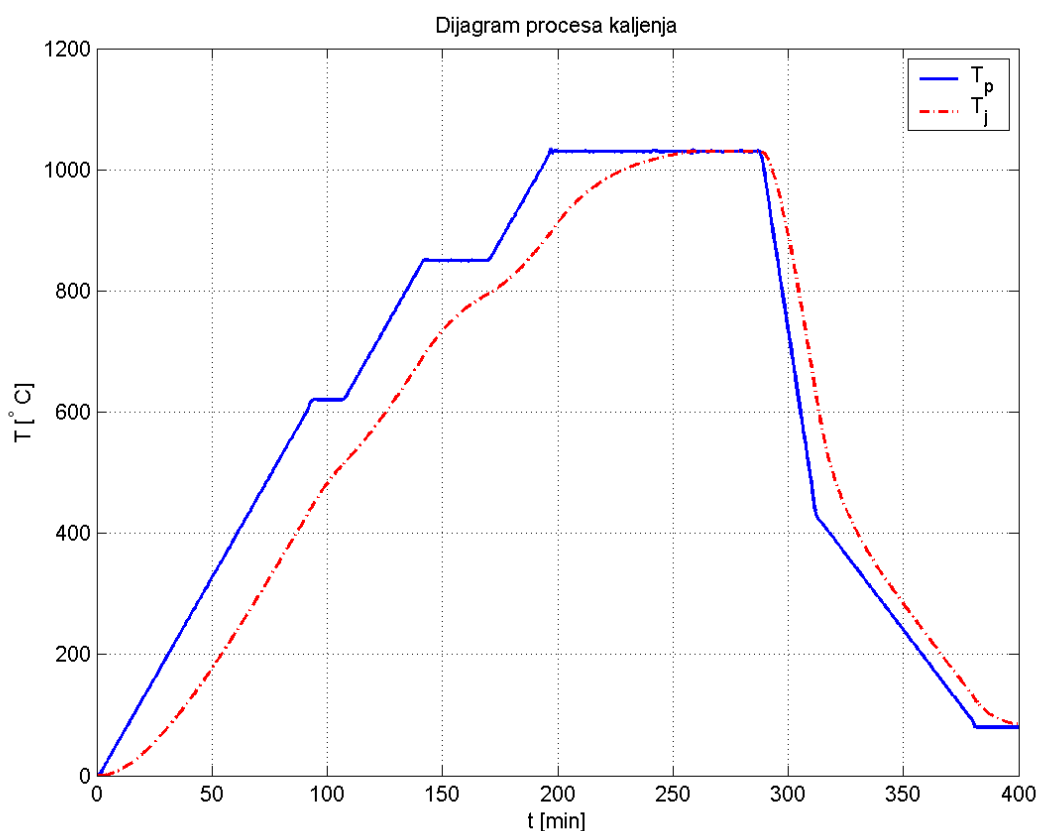
$e(t)$ regulacijsko odstupanje

$u(t)$ upravljačka veličina

$y(t)$ izlazna (regulirana) veličina

Na slici 3.17 prikazan je odziv simuliranog modela procesa kaljenja alatnog čelika za topli rad u programu Matlab. Program vođenja temperature površine koja je u programskoj korelaciji s temperaturom jezgre alata, izrađen je prema parametrima toplinske obradbe koje preporuča tvrtka Bodycote.

Proces kaljenja, iz razloga što se prate dvije temperature (temperatura površine i temperatura jezgre alata), opisuju dvije diferencijalne jednačbe prvog reda. Diferencijalna jednačba koja opisuje proces grijanja i hlađenja jezgre alata u zavisnosti je o diferencijalnoj jednačbi koja opisuje proces grijanja i hlađenja površine alata. Programski kod nalazi se u prilogu 1.



Slika 3.17. Odziv procesa na programski upravljano referentnu(vodeću) veličinu

4. ZAKLJUČAK

Toplinska obradba alata za topli rad provodi se radi postizanja odgovarajuće mikrostrukture koja bi omogućila mehanička svojstva koja se traže u eksploataciji. Opisani principi određivanja parametara kaljenja alata računskim metodama koji se primjenjuju pri vođenju procesa sa samo jednim mjernim osjetilom (termoelementom) za mjerenje temperature peći. Prema preporukama poznatih svjetskih tvrtki za kaljenje alata takav način se napušta jer se uvode dodatna osjetila za mjerenje temperature na površini i u jezgri alata. Uvođenjem dodatnih mjernih osjetila na površini i jezgri alata omogućeno je praćenje tijeka ugrijavanja i ohlađivanja po čitavom presjeku alata, što je jako značajno kod visokolegiranih alatnih čelika zbog toga što ti alati imaju nisku toplinsku vodljivost. Vođenje procesa s dva ugrađena mjerna osjetila mora biti u potpunosti automatizirano.

Opisane su pribavljene preporuke tvrtki *General Motors*, *Ford*, *Bohler* i *Bodycote* za provođenje kaljenja alata izrađenih od alatnog čelika za topli rad H13 s detaljnim opisima svih etapa procesa zagrijavanja i gašenja. Za preporuke tvrtke *Bodycote* izrađen je opisni i grafički tijek kaljenja normiranog testnog bloka čelika H13. Izvršena je analiza primjene postojećeg programskog regulatora *Shimaden* FP93, ali se zbog nemogućnosti nabavke dodatnog regulatora *Shimaden* SR83 nije se moglo provesti programiranje na programatoru. Na temelju analize dostupne literature i tehničkih podloga proizvođača upravljačke opreme, za automatizirano (bi) vođenje procesa kaljenja s dva ugrađena mjerna osjetila mogla bi poslužiti *Akvizijska kartica* (PCMCI NI Dag Card 6036E) tvrtke *National Instruments*. Za pripremu navedene kartice napravljen je program i simuliranje vođenja procesa kaljenja testnog bloka H13 u *Matlab*-u koji će biti osnova za programiranje u *LabView*-u. Prema tome, u nastavku rada na ovoj temi trebalo bi nabaviti navedenu *Akvizijsku karticu* te implementirati program. Alternativa ovakomu rješenju je nabava jeftinijeg kontrolera *Shimaden* SR83 koji bi se, uz postojeći programator *Shimaden* FP93, primijenio za cjelovito vođenje procesa kaljenja prema preporukama tvrtke *Bodycote*.

5. LITERATURA

- [1] F. Cajner, M. Stupnišek: Osnove toplinske obradbe metala, Sveučilište u Zagrebu 1996.
- [2] D. Krumes: Toplinska obradba, Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, Slavonski Brod, 2000.
- [3] M. Novosel, F. Cajner, D. Krumes: Alatni materijali, Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, Slavonski Brod, 1996.
- [4] R. Pavlović: Materijal čelik, SKTH/ Kemija u industriji, Zagreb 1990.
- [5] V. Đukić, B. Nedić: Alatni čelici, Naučna knjiga, Beograd 1990.
- [6] D. Landek: Podloge za vježbe iz kolegija: Toplinska obrada i površinska zaštita, FSB, Zagreb.
- [7] B. Liščić, M. Stupnišek, F. Cajner, T. Filetin: Toplinska obradba Praktikum, Sveučilište u Zagrebu 1992
- [8] Podloge za vježbe iz kolegija: Materijali II, FSB, Zagreb.
- [9] T Šurina: Automatska regulacija, Školska knjiga, Zagreb 1981.
- [10] <http://www.fer.hr/download/repository/MP02-KontaktnoMjerenjeTemperature.pdf>
- [11] Z. Vukuć, Lj. Kuljača: Automatsko upravljanje, Kigen d.o.o, Zagreb 2005.
- [12] *General Motors Powertrain specification* DC 9999-1
- [13] *Advanced Manufacturing Technology Development specification* AMTD-DC2010
- [14] http://www.bucorp.com/files/BOHLER_W302_Superior_Rev_Aug_2_2006.pdf
- [15] T. Wingens: Heat treating of H13 dies according to NADCA and GM Powertrain specification, 2nd international conference on the heat treatment and surface engineering of tools and dies, Bled, Slovenija, 2008.
- [16] Preporuke tvrtke *IPSEN-Kleve*, Germany
- [17] Prezentacija tvrtke *Uddeholm*, Sweden
- [18] <http://www.schmetz.de/e-html/systeme.php?cat=1>
- [19] www.bmi-fours.com
- [20] www.shimaden.com
- [21] <http://www.felixsmetal.hr>

5. PRILOG

5.1. Programski kod simulacije procesa kaljenja u *Matlab-u*

```
% Diferencijalna jednadzba procesa
function dy = proces (t, y)
global t1 t2 rezim;

% y(1) = temperatura površine
% y(2) = temperatura jezgre
% y(3) = integral pogreske (I-djelovanje regulatora)
dy = zeros(3,1);

% Parametri regulatora
Kp = 2;
Ki = 2;
%
Tp = 60/1600; % C/min - vremenska konstanta površine
Tj = 60/1600; % C/min - vremenska konstanta jezgre
Tj2 = 60/500; % za rezim 6+ (rezim gasenja)

% Pocetne postavke
if t==0      rezim = 0; t1=0; t2=1e6;u1=0;y1=0; end

% Generiranje reference
if rezim == 0  yd = 400/60*t; end
if rezim == 1  yd = 620; end
if rezim == 2  yd = 620 + 400/60*(t-t1); end
if rezim == 3  yd = 850; end
if rezim == 4  yd = 850 + 400/60*(t-t1); end
if rezim == 5  yd = 1030; end
if (rezim == 5)&&(t2>1e5)  yd = 1045; end
if rezim == 6  yd = 1030-25*(t-t1); end
if rezim == 7  yd = 425-5*(t-t1); end
if rezim == 8  yd = 80; end

% Razlika izmedju temp. površine i temp. jezgre
e2 = y(1)-y(2);

% Switchanje rezima
if (rezim == 0) && (yd>=620) rezim = 1; t1 = t; end
if (rezim == 1) && (e2<110) rezim = 2; t1 = t; end
if (rezim == 2) && (yd>=850) rezim = 3; t1 = t; end
if (rezim == 3) && (e2<55) rezim = 4; t1 = t; end
if (rezim == 4) && (yd>=1030) rezim = 5; t1 = t; end
if (rezim == 5) && ((y(2)>=1030)&&(t2>1e5)) t2 = t; end
if (rezim == 5) && (t-t1 >= 90) rezim = 6; t1 = t; end
if (rezim == 5) && (t-t2 >= 30) rezim = 6; t1 = t; end
```

```
if (rezim == 6) && (yd <= 425) rezim = 7; t1 = t; end  
if (rezim == 7) && (yd <= 80) rezim = 8; t1 = t; end
```

```
% Regulator
```

```
e = y(1) - yd;
```

```
u = -Kp * y(1) - Ki*y(3) ;
```

```
% Diferencijalne jednačbe procesa
```

```
dy(1) = Tp*(-y(1))+u;
```

```
if rezim < 6
```

```
    dy(2) = Tj*(-y(2)+y(1));
```

```
else
```

```
    dy(2) = Tj2*(-y(2)+y(1));
```

```
end
```

```
dy(3) = e;
```